



Manufatura Mecânica: Soldagem

Manufatura Mecânica: Soldagem

Samuel José Casarin

© 2018 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Pedro Donizeti Bolanho

Roberto Mac Intyter Simões

Editorial

Camila Cardoso Rotella (Diretora)

Lidiane Cristina Vivaldini Olo (Gerente)

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Leticia Bento Pieroni (Coordenadora)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Casarin, Samuel José

C335m Manufatura mecânica : soldagem / Samuel José Casarin.

– Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

248 p.

ISBN 978-85-522-1144-0

1. Processos por fusão. 2. Transferência metálica na soldagem. 3. Eletrodo. 4. Arco elétrico. I. Casarin, Samuel José. II. Título.

CDD 680

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2018

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 – Londrina – PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Fundamentos gerais da soldagem	7
Seção 1.1 - Introdução à soldagem: conceitos fundamentais	9
Seção 1.2 - Defeitos e qualidade em soldagem	29
Seção 1.3 - Termodinâmica da soldagem e soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas	48
Unidade 2 Metalurgia da soldagem	65
Seção 2.1 - Fundamentos da metalurgia da soldagem	67
Seção 2.2 - Defeitos na solda; tensões residuais; microestrutura	85
Seção 2.3 - Equipamentos e acessórios de soldagem convencional	105
Unidade 3 Processos convencionais de soldagem	125
Seção 3.1 - Processos de soldagem convencional	127
Seção 3.2 - Tipos e parâmetros de soldagem convencional	148
Seção 3.3 - Tratamentos térmicos e análise estrutural	169
Unidade 4 Processos não convencionais de soldagem	189
Seção 4.1 - Características gerais dos processos não convencionais de soldagem I	191
Seção 4.2 - Características gerais dos processos não convencionais de soldagem II	208
Seção 4.3 - Características gerais dos processos não convencionais de soldagem III	224

Palavras do autor

Olá, caro aluno. Seja bem-vindo ao mundo da soldagem, que será o foco desta disciplina, intitulada Manufatura Mecânica: Soldagem. Tenha certeza de que esse material abordará conteúdos de extrema importância para sua formação acadêmica e profissional, pois aqui você conhecerá o que é soldagem, onde ela se aplica, quais são suas características metalúrgicas, físicas (termodinâmicas) e limitações de aplicação, quais os equipamentos utilizados nos processos de soldagem, quais normas regem as operações de soldagem, quais os requisitos de segurança para realizar de forma segura uma solda, dentre outros conteúdos.

Objetiva-se nesta disciplina conhecer e compreender as características dos processos de soldagem observando a qualificação mínima e os princípios de segurança apropriados aos profissionais da área; conhecer e compreender os aspectos e características metalúrgicas que envolvem os processos de soldagem; conhecer os tipos, os processos, os parâmetros e as tecnologias utilizadas tanto na soldagem convencional quanto na soldagem não convencional.

Na primeira unidade, denominada “Fundamentos gerais da soldagem”, você irá conhecer e compreender os processos de união de materiais, em particular a soldagem, além de conhecer os principais processos de soldagem e informações básicas de sua tecnologia, que possibilitarão a análise dos principais procedimentos relacionados aos processos de soldagem, com segurança e respeitando as normas vigentes.

A segunda unidade, intitulada “Metalurgia da soldagem”, permitirá que você compreenda os aspectos metalúrgicos que envolvem os processos de soldagem, a fim de dimensionar o fluxo de calor e sua influência no processo de soldagem, compreender as características da Zona Fundida e da ZTA (Zona Termicamente Afetada), os defeitos de descontinuidades comuns em solda e os aspectos da macroestrutura de soldas por fusão, que possibilitarão a análise das propriedades de juntas soldadas, visando a aplicação industrial da soldagem.

Na terceira unidade, chamada “Processos e acessórios de soldagem convencional”, você irá se deparar com conteúdos que

agregarão conhecimento sobre os processos, as técnicas e os equipamentos de soldagem convencional, assim como fatores que influenciam no processo, visando a aplicação industrial dos processos convencionais de soldagem.

Finalmente, na quarta unidade, chamada "Processos não convencionais de soldagem", você conhecerá os processos, as técnicas e os equipamentos de soldagem não convencional, assim como fatores que influenciam nos processos de soldagem a laser, com feixe de elétrons, soldagem e corte a plasma e ter os conceitos gerais sobre os demais processos de soldagem (soldagem a frio, por aluminotermia, por explosão, por fricção convencional e por ultrassom), visando a aplicação industrial dos processos não convencionais de soldagem.

Veja, portanto, a diversidade de conteúdos sobre soldagem que você estudará ao longo desta disciplina. Sendo assim, é fundamental sua dedicação aos estudos, para consolidar esse conjunto de conhecimentos adquiridos, alicerçando ainda mais sua formação acadêmica e profissional.

Bons estudos!

Fundamentos gerais da soldagem

Convite ao estudo

Caro aluno, na área de atuação da mecânica e particularmente da metalurgia, o conhecimento dos processos de soldagem é de fundamental importância. Considerando que nesta primeira unidade de estudo trataremos dos fundamentos gerais da soldagem, temos que os conteúdos aqui abordados, de forma didática e, ao mesmo tempo, com uma linguagem técnica e profissional, irão nortear os seus estudos ao longo de toda a disciplina.

A soldagem faz parte do nosso mundo e da nossa rotina em diversas áreas e aplicações: desde em uma simples união de tubos em uma instalação hidráulica utilizada para conduzir água para diversos lugares até nos processos de fabricação de equipamentos e produtos de grande porte (por exemplo, na fabricação da estrutura de um navio e na produção de placas de comando utilizadas nos equipamentos eletroeletrônicos, compostas por elementos unidos por solda), os processos de soldagem são utilizados extensivamente. Portanto, se esses processos não existissem, provavelmente nossa realidade seria muito limitada.

Nesta unidade você irá conhecer e compreender as características dos processos de soldagem, observando a qualificação mínima e os princípios de segurança apropriados aos profissionais da área. A partir dessa competência, você estará apto a utilizar as terminologias e simbologias de soldagem; a utilizar os princípios de segurança, a respeito de: choque elétrico, fumos e gases, incêndios e explosões, radiação do arco elétrico, utilização de roupas de proteção e Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e; a utilizar

as normas em soldagem, além dos critérios de registro e qualificação de procedimentos e de pessoal.

Você terá uma série de desafios nas próximas seções da unidade. Usando toda a sua capacidade de liderança, deverá conduzir um treinamento de capacitação em soldagem na empresa que o contratou. Lembre-se ainda de que essa empresa prestadora de serviços de soldagem está passando por um processo de reestruturação geral e que você foi contratado como um consultor especializado em solda a fim de aplicar um programa de capacitação e treinamento dos novos funcionários da área de soldagem e da área de controle de qualidade. O objetivo desse programa é melhorar a qualidade das soldas realizadas, evitando a ocorrência de defeitos, além de zelar pela segurança dos funcionários, evitando danos físicos ao soldador e degradação ao meio ambiente.

Você acha que um processo de capacitação em soldagem para funcionários de uma empresa que trabalha com solda é importante? Acredita que os resultados obtidos após a capacitação contribuirão para a empresa conseguir captar e fidelizar novos clientes?

Para conduzir essa capacitação, uma série de conteúdos serão mobilizados, envolvendo os conceitos fundamentais de soldagem, os defeitos e qualidades em soldagem e a termodinâmica da soldagem em ligas ferrosas e não ferrosas.

Portanto, estude bastante e bom trabalho!

Seção 1.1

Introdução à soldagem: conceitos fundamentais

Diálogo aberto

Caro aluno, a soldagem sempre foi um importante processo de fabricação e faz parte do nosso dia a dia. Você acha que grandes estruturas metálicas e extensas tubulações metálicas poderiam ser construídas sem a existência da soldagem?

Nesta seção, iremos estudar as características gerais da soldagem: a solda (fusão), o soldador, os equipamentos, as áreas aplicadas; você também verá os parâmetros gerais da soldagem: corrente (A), tensão (V), vazão de gás (l/mm), consumíveis, cordão de solda (áreas específicas, como a Zona Termicamente Afetada – ZTA); irá conhecer as terminologias e simbologias de soldagem, além das normas em soldagem; e, finalizando o estudo desta seção, você terá noções de princípios de segurança em soldagem.

Lembrando que, nesta unidade, você foi contratado como consultor especializado em soldagem por uma grande empresa prestadora de serviços de soldagem que está passando por um processo de reestruturação geral. Nesse contexto, você irá aplicar um programa de capacitação e treinamento dos novos funcionários. Tal programa tem três frentes de trabalho e uma delas envolve conceitos fundamentais de soldagem e normas de soldagem e segurança. Tem-se que uma das normas mais importantes na soldagem é o sistema de classificação de eletrodos da AWS (*American Welding Society* – Sociedade Americana de Soldagem). A empresa que o contratou utiliza essa norma para atender às exigências dos seus clientes. Assim, é de fundamental importância que seus soldadores saibam o significado de determinadas siglas referentes a essa norma, principalmente no momento de selecionar o eletrodo adequado para realizar o processo de soldagem.

Durante o treinamento, você apresentou aos participantes algumas fichas de procedimento de soldagem com as seguintes indicações: E-7016, E-12012; E-6011 e E-7012-A1. Você solicitou a eles a indicação do significado detalhado dessas especificações.

Identificados os tipos de procedimentos de soldagem, você questionará aos participantes quais medidas de segurança são necessárias para se realizar essas soldas e, finalmente, eles deverão indicar quais os parâmetros de soldagem mínimos que devem ser especificados. É possível quantificá-los? Qual norma seria a alternativa à da AWS?

Após o treinamento, você deverá entregar ao seu contratante um relatório sobre o aproveitamento (ou seja, o conhecimento adquirido) dos soldadores em relação à leitura e interpretação da codificação da norma AWS e aos demais questionamentos realizados durante o treinamento.

Tenha em mente a importância do autoestudo, pois os conteúdos mobilizados nesta seção são fundamentais para que você resolva com sucesso o desafio proposto. Além disso, os conhecimentos que você irá adquirir aqui são indispensáveis para um profissional da área de mecânica e metalurgia, que pretenda trabalhar na área de soldagem ou de processos de fabricação. Bons estudos!

Não pode faltar

Iniciamos agora nossos estudos sobre soldagem, que é um dos grandes temas da área de mecânica e metalúrgica, seja no processo de fabricação mecânica ou nos fenômenos metalúrgicos que veremos ocorrer nos processos de soldagem. Temos que a soldagem é amplamente empregada na indústria metal-mecânica tais como automobilística, naval (estaleiros), indústria de equipamentos agrícolas, indústria petrolífera e de gases (em tubulações terrestres e aquáticas), eletroeletrônica, dentre muitas outras.

Características gerais da soldagem: a solda (fusão), o soldador, os equipamentos e as áreas aplicadas

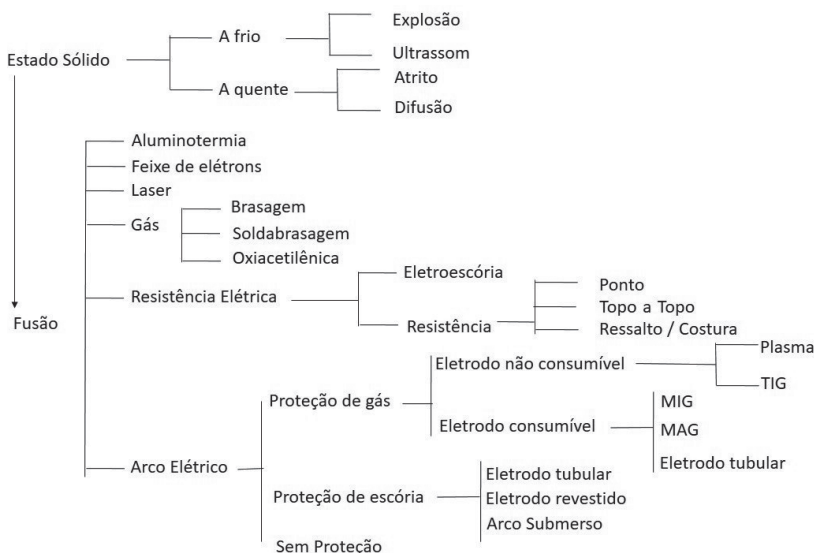
Para falarmos sobre soldagem, precisamos definir primeiramente o que é esse processo. Segundo Brandi (2015, p. 1), denomina-se soldagem o processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo. A opção pelo uso da soldagem se dá quando se quer uma integração maior entre as partes unidas e que apresente elevada resistência mecânica. A solda é também

uma opção quando a união entre as partes fica impossibilitada de ser realizada pelos outros processos (parafuso, rebite, cola, etc.) ou mesmo quando há a junção de partes delicadas de um conjunto, como de pequenos componentes eletrônicos.

O Portal Metálica elenca um conjunto de vantagens e desvantagens da utilização de um processo de soldagem, a seguir reproduzidos. Como **vantagens**, temos: juntas de integridade e eficiência elevadas; grande variedade de processos; aplicável a diversos materiais; operação manual ou automática; pode ser altamente portátil; juntas podem ser isentas de vazamentos; custo, em geral, razoável; junta não apresenta problemas de perda de aperto. Como **desvantagens**, temos que: não pode ser desmontada; pode afetar a microestrutura e propriedades das partes; pode causar distorções e tensões residuais; requer considerável habilidade do operador; pode exigir operações auxiliares de elevado custo e duração (por exemplo, tratamentos térmicos); estrutura resultante é monolítica e pode ser sensível à falha total.

Os processos de soldagem são muito diversificados e, segundo Brandi (2015, p. 3), obedecem à classificação apresentada na Figura 1.1.

Figura 1.1 | Classificação dos processos de soldagem



Fonte: adaptada de Brandi (2015, p. 3).

Um outro termo muito importante definido pela AWS (*American Welding Society* ou Sociedade Americana de Soldagem) é o de

soldabilidade que, conforme cita Modenesi (2011, p. 1), é definida pela capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço.

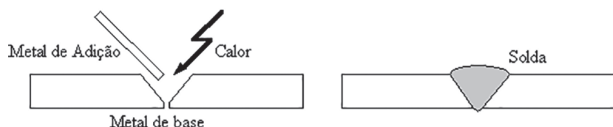


Refleta

De acordo com o conceito de soldagem, foi destacado que esse processo trata da união de duas partes metálicas. Será que é possível definirmos a soldagem para materiais que não sejam metálicos?

Nos processos de soldagem tradicional, usa-se uma fonte de calor capaz de gerar energia suficiente para derreter o material de base. Temos, assim, a soldagem por fusão, na qual a união dos metais ocorre por junção parcial das partes próximas uma à outra, ou seja, entre o metal de adição e o metal base. A Figura 1.2 a seguir ilustra como ocorre o processo de soldagem por fusão. Tem-se que o metal de adição é aquele que será o responsável por unir as duas partes a serem soldadas e metal base é o material da peça principal. Vale ressaltar que é de extrema importância que exista afinidade química entre o metal de adição e o metal base, que a quantidade de energia (calor) para a fusão seja adequada, que o soldador seja hábil, dentre outros fatores. Concluído o processo de soldagem, tem-se a solda final representada por um cordão de solda.

Figura 1.2 | Desenho esquemático do processo de soldagem por fusão



Fonte: adaptado de Portal Metálica. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/o-que-e-soldagem>>. Acesso em: 3 maio 2018.

Observe dois pedaços de gelo que são aproximados até se encostarem. Temos que os dois pedaços se unem. Podemos afirmar que esse fenômeno também ocorre na soldagem em função da aproximação das superfícies das peças a serem unidas, a uma distância tal que propicie a ocorrência de ligações químicas entre os seus átomos.



Um conceito que precisa ser assimilado é o de que a soldagem é um processo de fabricação que usa uma fonte de calor para unir (soldar) duas partes (ou peças) metálicas que tenham afinidade química e metalúrgica (soldabilidade); e que o calor gerado pela corrente elétrica consegue fundir os metais que serão unidos, formando um cordão de solda (o cordão de solda é formado pelo metal de preenchimento: eletrodo + metal base).

O seguinte fenômeno pode ocorrer no processo de soldagem de alguns materiais: o grau de rugosidade da superfície a ser soldada é tão elevado ou, pode existir uma camada substancial de óxido ou de substâncias gordurosas e contaminantes em geral, que impedem a realização da solda por não haver uma aproximação adequada para as ligações químicas, responsáveis por unir as partes.

O profissional que realiza a operação de soldagem é o soldador que, por sua vez, deve ser altamente qualificado para realizar o trabalho de maneira adequada. O soldador deve ter habilidade para realizar soldas de boa qualidade, livres de defeitos e imperfeições, ter destreza manual, conhecer profundamente os processos de soldagem e as características de equipamentos, consumíveis e materiais de soldagem. Em diversos setores industriais (automotivo e naval, por exemplo), o processo de soldagem passou a ser automatizado (realizado por robôs), fato que restringiu a área de atuação do soldador.

Os equipamentos e materiais de soldagem envolvem um conjunto de elementos que variam de acordo com o tipo de soldagem, como mostra a Fugira 1.3. Em linhas gerais, os principais equipamentos e materiais de soldagem são os seguintes: porta-eletrodos, grampos, conectores, terminais de cobre, picadeiras de solda, pistolas, eletrodos (consumíveis), gases e cilindros, limpadores de bico, mangueiras de solda, válvulas de retenção, manômetros, carrinho de solda, fluxômetros, antirrespingos, maçaricos, arames e varetas, fluxos (definido como um fluido líquido ou na forma de pasta, cuja função é remover a fina camada de óxido que se forma na superfície a ser soldada, criando um bom contato metal-metal), reguladores de pressão, fonte de energia, transformadores para soldagem, retificadores de corrente, entre outros.

Figura 1.3 | Exemplos de equipamentos e materiais de soldagem



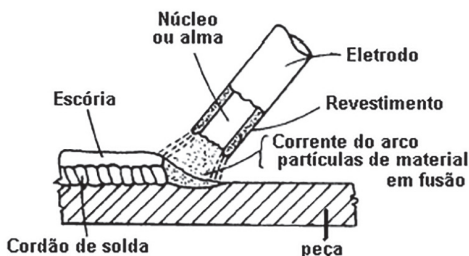
Fonte: (a) <<https://www.logismarket.ind.br/megasolda-equipamentos/maquina-de-solda-inversora-portatil/2292962993-2970107806-p.html>>; (b) <<http://www.zaninequipamentos.com.br/zaninequipamentos.com.br/index.html>>. Acesso em: 19 abr. 2018.

Parâmetros gerais da soldagem: corrente (A); tensão (V); vazão de gás (l/mm); consumíveis, o cordão de solda (áreas específicas, como a ZTA)

O processo de soldagem caracteriza-se por possuir o que chamamos de “parâmetros gerais de soldagem”, as variáveis envolvidas na operação de soldagem que devem ser especificadas para cada tipo de soldagem. Vejamos quais são esses parâmetros.

Já compreendemos que a soldagem ocorre por fusão dos materiais envolvidos. A fusão ocorre por causa do insumo de calor que é gerado pela intensidade da corrente elétrica aplicada (dada em Ampère, [A]) ou pela formação de um arco elétrico. No caso do aquecimento por corrente elétrica, tal aquecimento ocorre por efeito Joule e, no caso do arco elétrico, o aquecimento é resultado do potencial de ionização, da corrente elétrica e de outros parâmetros de soldagem (Brandi, 2015, p. 7). Para se ter uma ideia da intensidade da corrente elétrica na soldagem, ela chega a alcançar 500 A ou mais. A Figura 1.4 a seguir ilustra como ocorre a soldagem a arco elétrico.

Figura 1.4 | Desenho esquemático do processo de soldagem a arco elétrico



Fonte: Macedo ([s.d.]).

Se por um lado a amperagem é a responsável por gerar o calor para fundir o metal na soldagem, a tensão (dada em [V]) está associada ao equipamento de soldagem, que deverá fornecer uma tensão entre 10 V e 40 V. As máquinas de soldagem devem ser versáteis, permitindo que se faça a regulagem tanto da corrente como da tensão, de acordo com as características do projeto de soldagem.

Em muitos casos, a soldagem exige a utilização de um gás de proteção que tem como função proteger a solda contra contaminação por agentes externos e prevenir oxidação. Assim, a solda pode ser realizada sob vácuo, com gás inerte, com gás ativo, com proteção por fluxo (escória) e sem proteção. Entre os gases de proteção, destacam-se o hélio e o argônio, que podem ser usados de forma separada ou na forma composta, ou seja, misturados. Esses dois gases são chamados gases inertes. Por outro lado, existe uma categoria de gás de proteção chamada de gases ativos, tais como o CO_2 , O_2 , N_2 e H_2 . Gases inertes e gases ativos podem ser utilizados de forma misturada.

A vazão do gás (dada em litros/minuto) deve ser regulada de acordo com o tipo de solda. A relação entre a amperagem e a tensão elétrica é um fator que afeta a escolha do gás de proteção. Segundo o Portal Brasileiro de Soldagem (INFOSOLDA), para comprimentos equivalentes do arco, o hélio apresenta tensão apreciavelmente maior do que o argônio, o que indica o uso de hélio em caso da soldagem de metais de boa condutibilidade térmica e elevados pontos de fusão. Todavia, a estabilidade do arco é também fator importante, fazendo com que seja preferida a utilização do argônio ao hélio. Além disso, o argônio é mais denso e possui um potencial de ionização menor, o que favorece a abertura do arco. Por outro lado, há de se considerar que o hélio possui maior condutividade térmica em relação ao argônio, e, conseqüentemente, tem maior penetração da soldagem. Porém, quando se usa oxigênio misturado ao acetileno (oxiacetileno) deve-se ajustar a vazão do acetileno até a obtenção de uma chama sem fuligem e, posteriormente, abrir lentamente a válvula de oxigênio até obter a chama desejada.

Os gases de proteção formam uma categoria de consumíveis em soldagem. Uma outra categoria de consumíveis de soldagem a ser considerada é a dos eletrodos. Eletrodo, segundo uma definição mais abrangente, é o nome genérico dado aos polos condutores

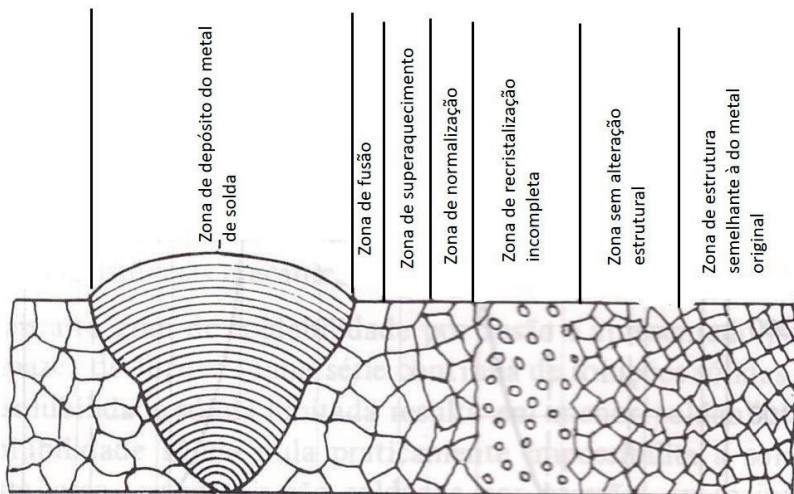
de corrente elétrica de um sistema que gera ou consome energia elétrica (CIMM, [s.d.]).

No processo de soldagem, o eletrodo é a barra de metal pela qual passa a corrente elétrica (que corresponde ao polo negativo ou cátodo) para o metal base ou peça (que corresponde ao polo positivo ou ânodo) conforme ilustra a Figura 1.4.

Existem eletrodos de vários tipos (com e sem revestimento, na forma de varetas ou de arames), que são usados para fluxos variados (por exemplo, no processo de solda a arco submerso).

Ao realizar uma solda, forma-se o chamado cordão de solda, que possui características e morfologia peculiares. É no cordão de solda que ocorre uma série de fenômenos metalúrgicos que vão definir a qualidade da solda realizada. A Figura 1.5 nos mostra quais são esses fenômenos metalúrgicos observáveis no cordão de solda e nas suas vizinhanças.

Figura 1.5 | Representação esquemática dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem no processo de soldagem

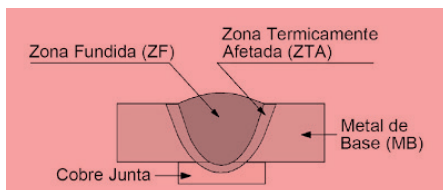


Fonte: adaptada de Chiaverini (1986, p. 166).

Em relação às regiões afetadas pela soldagem, temos que uma região se destaca, pois é nela que ocorrerem a maioria dos fenômenos metalúrgicos: a Zona Termicamente Afetada, ou ZTA, mostrada na Figura 1.6. Essa região, também denominada Zona Afetada pelo Calor (ZAC), é a região compreendida entre a zona de fusão e a zona de recristalização incompleta, que sofreu

modificações em suas propriedades mecânicas e/ou metalúrgicas, devido à imposição do aquecimento (mudança brusca de temperatura) decorrente da operação de soldagem e/ou corte (PAREDES, [201-?], p. 7).

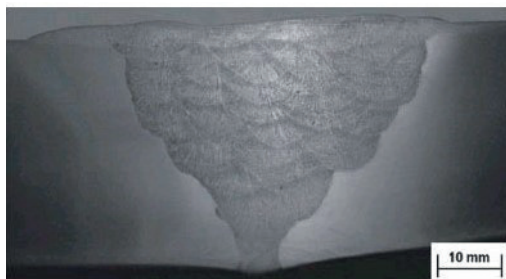
Figura 1.6 | Desenho esquemático das regiões de uma área soldada



Fonte: <<http://www.caldnazza.com/2013/01/soldagem.html#.Wqg68ejwbIV>>. Acesso em: 3 maio 2018.

A Figura 1.7 a seguir mostra a macrografia de uma solda, destacando o cordão de solda (solda) e a Zona Termicamente Afetada (ZTA) nas vizinhanças do cordão de solda.

Figura 1.7 | Macrografia de uma solda e suas regiões



Fonte: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=814>. Acesso em: 3 maio 2018.

Terminologia e simbologia de soldagem; normas em soldagem

Como todo processo que exige qualidade e formas internacionais de se especificar modelos, metodologias e controles, a soldagem possui terminologias e simbologias próprias que são fundamentadas em normas internacionais e nacionais.

Dentre as várias normas aplicáveis à soldagem, a mais utilizada é a da AWS. Além dos organismos internacionais (como a AWS), muitas empresas multinacionais têm a sua própria norma e/ou terminologia, fazendo com que os fornecedores dessas empresas adaptem seus procedimentos de soldagem as suas normas, principalmente em relação à qualidade. Por exemplo, podemos citar o *Manual de qualidade de fornecedor*, da John Deere –

JDS-G223 (disponível em: <https://jdsn.deere.com/wps/wcm/connect/jdsn/66d367004d1bd3c28bbebba912093b63/supplier_quality_manual_portuguese.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: 3 maio 2018), e a Caterpillar/EMD (Electric Motive Diesel) na área de fabricação de locomotivas.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é o organismo nacional que normaliza o processo de soldagem.

Tem-se que a terminologia e a simbologia da soldagem são muito extensas e diversificadas, portanto, veremos aqui somente as principais simbologias. A título de exemplo temos a NBR 10474 – Qualificação em soldagem: terminologia, e a norma AWS A2.4 2012 *Standard Symbols for Welding, Brazing, Nondestructive Examination*, (ou seja, “Normas de Símbolos para Soldagem, Brasagem e Ensaio não destrutivos”).

Segundo o Portal Brasileiro de Soldagem:



[...] a simbologia de soldagem diz respeito à representação gráfica de todas as informações que são necessárias ao desenvolvimento do trabalho dos profissionais da área. As várias normas que regem a simbologia de soldagem correspondem aos processos de trabalho de indústrias europeias, americanas e asiáticas, tais como AWS – *American Welding Society*; Euronorm, norma europeia; ISO – *International Standard Organization*; JIS – *Japanese Industrial Standards*. As normas mais utilizadas no Brasil são da AWS A2.4 2012 e da ABNT NBR 10474, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (INFOSOLDA, [s.d.]



Pesquise mais

As terminologias (termos técnicos) e as simbologias utilizadas na soldagem abrangem uma extensa lista de denominações que nem sempre são de amplo domínio de quem está se inserindo na área de processos de soldagem. Para aprofundar o seu conhecimento sobre o tema, consulte os materiais a seguir:

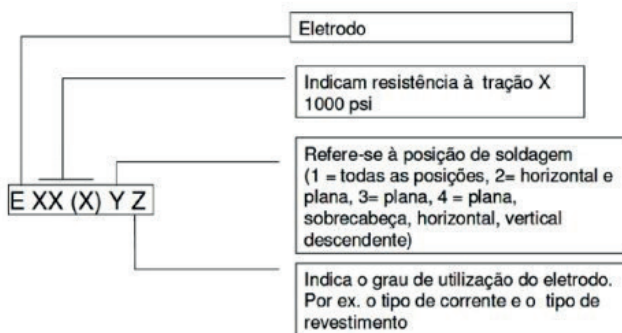
TERMINOLOGIA da Soldagem. **Portal met@lica construção civil**, [s.d]. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/terminologia-da-soldagem>>. Acessado em: 3 maio 2018.

SIMBOLOGIA de soldagem – símbolos básicos. **Infosolda**, [s.d]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/simbologia-de-soldagem/287-simbologia-de-soldagem-simbolos-basicos.html>>. Acesso em: 3 maio 2018.

Segundo o Portal Brasileiro de Soldagem, temos que os símbolos são desenhos que representam orientações para o processo de soldagem; indicam a geometria das juntas, as dimensões e o ângulo do chanfro, a abertura de raiz, o comprimento da solda, o local de trabalho, entre outras informações.

Um dos elementos mais importantes no processo de soldagem é o eletrodo, responsável por realizar o preenchimento do canal de solda no metal base. Tanto a ABNT como a AWS possuem normas para designar um determinado tipo de eletrodo. Falando em tipo de eletrodo, vamos considerar, preliminarmente, dois deles: os eletrodos sólidos (usados na soldagem GMAW – núcleo sólido e metálico) e os tubulares (usados na soldagem FCAW) com núcleo. Temos que o termo GMAW vem do inglês *Gas Metal Arc Welding*, traduzido para o português como “Soldagem a Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa”; e o termo FCAW, que vem do inglês *Flux Cored Arc Welding*, ou em português “Soldagem a Arco Elétrico com Arames Tubulares”. Segundo a AWS, a forma de especificar esses dois tipos de eletrodos segue as regras ilustradas nas Figuras 1.8 e 1.9 conforme segue:

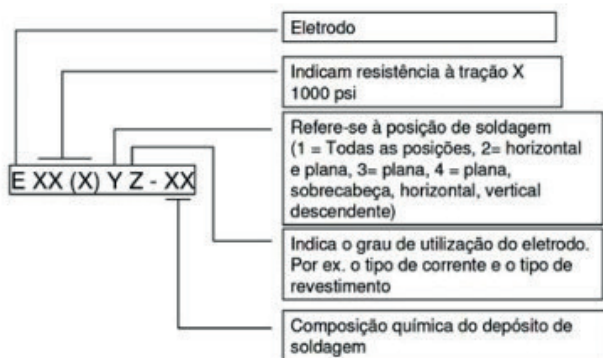
Figura 1.8 | Designação para eletrodos sólidos revestidos (AWS A5.1) para aço carbono



Fonte: ESAB (2005, p. 11). Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 3 maio 2018.

Observe que a classificação da Figura 1.8 refere-se a eletrodos para soldagem de aço carbono. No caso de aços ligados, temos que a Figura 1.9 indica a forma de designar o eletrodo.

Figura 1.9 | Designação para eletrodos tubulares com núcleo (AWS A5.5) para aços de baixa liga



Fonte: ESAB (2005, p. 23). Disponível em: <http://www.esab.com.br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 3 maio 2018.



Exemplificando

A fim de ilustrar a utilização das normas, tem-se que, segundo a norma AWS A5.5, o eletrodo de classificação **E7018-A1** indica:

- Um eletrodo (letra E).
- Um limite de resistência mínimo de 70.000 psi (70 ksi).
- Soldabilidade em todas as posições (1).
- Baixo hidrogênio com adição de pó de ferro (8).
- Contém normalmente 0,5% de molibdênio (A1).

Segundo a norma AWS A5.1, o eletrodo de classificação E6013 indica:

- Um eletrodo (letra E).
- Limite de resistência mínimo de 60.000 psi (60 ksi).
- Soldagem em todas as posições (1).
- Composição química de rutilica (3).

Nota-se, portanto, a importância de se ter um catálogo de fabricante em mãos, a fim de termos a especificação completa do eletrodo.

A *American Society of Mechanical Engineers* (ASME ou, em tradução literal, Sociedade Americana de Engenharia Mecânica) utiliza na íntegra as especificações de eletrodos da AWS adicionando as letras SF antes do número da especificação. Portanto, a especificação AWS A5.1 transforma-se na especificação ASME SFA5.1. Tanto a classificação quanto os requisitos são os mesmos, de acordo com a ESAB. Finalizando, temos que diversas especificações e classificações podem ser consultadas em catálogos de fabricantes.

Segurança em soldagem

A soldagem é uma operação que envolve uma série de variáveis que devem ser monitoradas e controladas, a fim de que não causem danos físicos ao soldador e degradação ao meio ambiente. Dentre essas variáveis, podemos citar: o calor, a elevada luminosidade, a ocorrência de faíscas, a utilização de corrente e tensão elétrica inadequadas, dentre outras. Esse fato exige que o soldador utilize equipamento específico para executar a operação de soldagem. Sendo assim, os EPIs (Equipamentos de Proteção Individual) mais recomendados são os seguintes: aventais raspa; máscaras de solda com lentes na tonalidade correta; blusão de soldador; mangote de raspa; botas de proteção com solado isolante; luvas de vaqueta ou de raspa; perneiras; touca de soldador; máscara para fumos de solda; óculos de proteção; protetores auriculares. A Figura 1.10 apresenta um desenho esquemático de um soldador utilizando os EPIs recomendados.

Figura 1.10 | Desenho esquemático da utilização de EPI para soldagem



Fonte: <<http://www.omaquinista.com/index.php?topic=1685.15>>. Acesso em: 3 maio 2018.

Além dos EPIs há de se utilizar também (ter disponíveis) os EPCs, os chamados Equipamentos de Proteção Coletiva, dentre os quais destacam-se: extintores de incêndio, cortinas inactínicas (antichamas), sistemas de extração de gases, entre outros.

Ainda referente à segurança, o posto de soldagem deve ser localizado em uma região segura da oficina, de tal forma que o operador não trabalhe de forma isolada ou confinado, pois o calor e a inalação de gases podem ocasionar sérios problemas de saúde ao operador. Portanto, sempre que possível, a presença de um auxiliar deve ser prevista no ambiente de soldagem, o qual também deverá fazer uso de EPI.

Existem algumas normas (NR, ou seja, Norma Regulamentadora) que regulam alguns procedimentos, tais como a NR 18 (BRASIL, 1978) e a NR 34 (BRASIL, 2011) que tratam de operações de soldagem e corte. A NR 18 (BRASIL, 1978) faz algumas exigências, tais como: “as operações de soldagem e corte a quente somente podem ser realizadas por trabalhadores qualificados” e :



[...] nas operações de soldagem ou corte a quente de vasilhame, recipiente, tanque ou similar, que envolvam geração de gases confinados ou semiconfinados, é obrigatória a adoção de medidas preventivas adicionais para eliminar riscos de explosão e intoxicação do trabalhador.

Retomando o contexto apresentado, lembre-se de que você foi contratado como um consultor especializado em solda e está aplicando um programa de capacitação e treinamento para os funcionários do setor de soldagem. Nessa fase da capacitação será realizada a classificação de eletrodos da AWS (American Welding Society – Sociedade Americana de Soldagem). Aqui você usará toda sua capacidade de liderança para conduzir o treinamento.

Você apresentou aos participantes algumas fichas de procedimento de soldagem com as seguintes indicações: E-7016, E-12012; E-6011 e E-7012-A1. Você solicitou a eles que indiquem o significado detalhado dessas especificações.

Para resolver essa primeira parte da capacitação será importante aplicar os conceitos da norma AWS para especificação dos eletrodos, conforme mostrado nas Figuras 1.8 e 1.9. Dessa forma, para cada eletrodo, teremos a seguinte especificação, lembrando que é importante nesse momento, se possível, ter em mãos um catálogo de fabricante de eletrodos:

a) E-7016 (Norma AWS A5.5):

E = Eletrodo

70 = força de tração = 70.000 psi = 70 ksi

1 = todas as posições de soldagem

6 = eletrodo de usabilidade de grau 6 (revestimento básico)

b) E-12012:

E = Eletrodo

120 = resistência à tração de 120.000 psi = 120 ksi

1 = todas as posições de soldagem

2 = eletrodo de usabilidade de grau 2 (revestimento rutilico)

c) E-6011:

E = Eletrodo

60 = força de tração da solda = 60.000 psi = 60 ksi

1 = todas as posições de soldagem

1 = eletrodo de grau 1 de usabilidade

d) E-7012-A1:

E = Eletrodo

70 = força de tração da solda = 70.000 psi = 70 ksi

1 = todas as posições de soldagem

2 = grau de usabilidade 2 (revestimento rutílico)

A1 = teor de molibdênio (0,50%)

Note que estamos focados na norma americana AWS, porém a norma brasileira ABNT ou a norma ISO poderiam ser utilizadas.

Identificadas todas as classificações dos eletrodos e os tipos de procedimentos de soldagem, para fazer uso desses eletrodos, tem-se que as medidas de segurança que são necessárias para se realizar essas soldas envolvem a obrigatoriedade do uso de EPI, de acordo com os acessórios apresentados.

Com os dados disponíveis, no momento não temos como quantificar os parâmetros de soldagem necessários para realizar a solda com esses eletrodos. Porém, não podemos esquecer que deveremos saber especificar: a corrente de soldagem, dada em Ampère; qual dos eletrodos disponíveis usaremos; qual tipo de proteção gasosa será necessária e qual a sua vazão, dada em l/min; qual tipo de solda será utilizada; e quais serão os principais parâmetros a serem especificados.

Vale aqui uma nota do site *Clube das Oficinas* (disponível em: <<http://clubedasoficinas.com.br/2013/08/passo-a-passo-soldagem-migmag>>. Acesso em: 3 maio 2018), que é focado em soldagem:



[...] é recomendado que a vazão de trabalho do gás de proteção seja regulada em 10 vezes o diâmetro da bitola do arame eletrodo: para um arame eletrodo de 0,8 mm, a vazão de trabalho do gás de proteção deve ser regulada em 8 l/min. Para evitar danos ao manômetro, ou até mesmo possíveis acidentes, sempre que houver a necessidade de substituir o gás de proteção, deve-se primeiro aliviar a pressão da vazão de trabalho, pelo regulador do cilindro. E também verificar e corrigir possíveis vazamentos em mangueiras e conexões.

Concluída essa etapa do treinamento, na qual você utilizou todo o conteúdo mobilizado nesta seção, você deverá entregar

ao seu contratante um relatório sobre o aproveitamento (ou seja, o conhecimento adquirido) dos participantes em relação à leitura e interpretação da codificação da norma AWS e aos demais questionamentos realizados durante o treinamento.

Lembre-se de que esses fundamentos iniciais de soldagem são de grande importância para seu desenvolvimento na disciplina e, futuramente, na sua área profissional de atuação.

Finalmente, se atente para o fato de que os conteúdos aqui trabalhados contribuirão para você conhecer as características gerais do processo de soldagem, suas terminologias e simbologias, assim como os princípios e equipamentos de segurança, a qualificação mínima exigida ao profissional de soldagem e as normas em soldagem.

Avançando na prática

Seleção do gás de proteção para realizar um processo de soldagem

Descrição da situação-problema

Você irá realizar o processo de soldagem na junta de uma placa metálica de aço carbono comum, porém, de acordo com o controle de qualidade da empresa, o cordão de solda final deverá estar livre de contaminantes e impurezas. Sendo assim, foi fornecido a você uma lista de possíveis gases para usar na proteção do cordão de solda: Argônio (pureza de 98%), Hélio (pureza de 97%) e O_2 . O seu papel será selecionar qual gás da relação apresenta melhor característica de proteção da solda a ser realizada. Por fim, justifique a escolha e os motivos da exclusão dos demais.

Resolução da situação-problema

Para selecionar um gás de proteção para o processo de soldagem, deve-se levar em conta alguns fatores, tais como: nível de pureza do gás, possibilidade de misturá-lo com outro gás de proteção, estabilidade do arco elétrico e custo.

Considerando os três gases oferecidos, temos dois gases nobres (o Hélio e o Argônio); e um gás ativo (O_2). O gás Hélio é indicado em caso da soldagem de metais de boa condutibilidade térmica e elevados pontos de fusão (o aço carbono comum tem ponto de fusão elevado).

O Argônio contribui para maior estabilidade do arco elétrico. Além disso, é um gás mais denso e tem um grau de pureza maior que a do gás Hélio. Comparativamente ao Hélio, tem menor custo. Finalmente, o oxigênio (O_2) é um gás ativo, mais barato do que o Hélio e o Argônio. Porém, sua utilização pode contribuir para a oxidação do eletrodo, que deve ser evitada a fim de manter a qualidade da solda.

Logo, a melhor opção para termos um cordão de solda final livre de contaminantes e impurezas é a utilização do Argônio (98%).

Faça valer a pena

1. A soldagem é um dos principais processos de fabricação mecânica. É por meio dela que é possível fazer a união de duas partes metálicas, visando compor um conjunto mecânico ou uma peça. Para que a soldagem entre dois metais ocorra, é necessário a utilização de insumo de calor e que os dois metais tenham soldabilidade compatível.

Assinale a alternativa correta a respeito dos insumos de calor e da soldabilidade.

- a) O insumo de calor é necessário para fundir as duas partes e a soldabilidade está relacionada somente com o tipo de solda.
- b) O insumo de calor é necessário somente para aquecer as partes um pouco abaixo da temperatura de fusão e a soldabilidade refere-se à equivalência de composição química entre os dois metais.
- c) O insumo de calor é gerado por uma fonte de energia elétrica e é necessário para fundir as duas partes a serem unidas e a soldabilidade refere-se à afinidade de composição química entre os dois metais.
- d) O insumo de calor se deve à elevada tensão da fonte elétrica e a soldabilidade está associada somente à composição química dos metais.
- e) O insumo de calor é gerado por uma fonte elétrica e é necessário para fundir as duas partes a serem unidas e a soldabilidade refere-se à realização de um tratamento térmico prévio nas partes soldadas.

2. Na soldagem dos metais, devido às alterações metalúrgicas que são observadas na região da solda (incluindo suas vizinhanças), uma região é de grande importância: a ZTA, ou Zona Termicamente Afetada. Dessa forma, podemos inferir que:

(I) A Zona Termicamente Afetada (ZTA), também denominada de Zona Afetada pelo Calor (ZAC) é a região compreendida entre a zona fundida e o metal de base não afetado termicamente.

PORQUE

(II) Trata-se de uma região que sofreu modificação das propriedades mecânicas e/ou metalúrgicas, devido à imposição do aquecimento

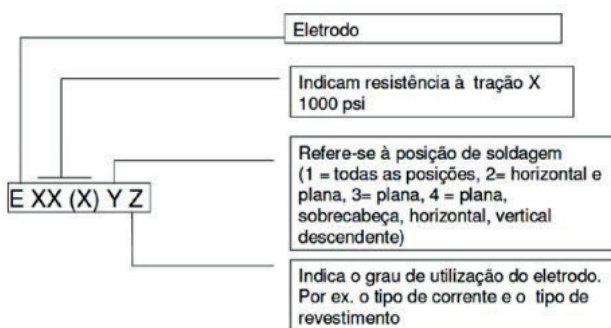
(mudança brusca de temperatura) decorrente da operação de soldagem e/ou corte.

De acordo com o texto base, podemos afirmar que:

- a) As assertivas I e II estão corretas e se complementam.
- b) As assertivas I e II não estão corretas.
- c) A assertiva I está correta, mas a assertiva II não está correta.
- d) A assertiva I não está correta, mas a assertiva II está correta.
- e) As assertivas I e II estão corretas, mas não se complementam.

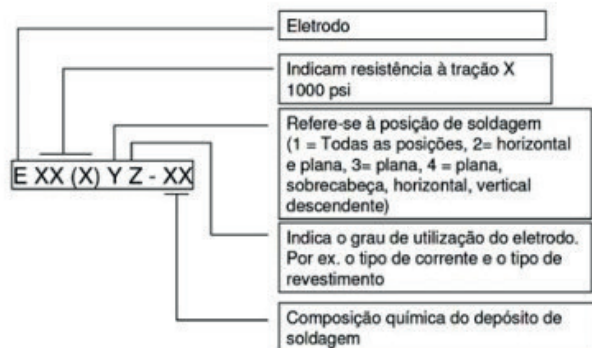
3. A AWS é a organização internacional responsável pelas normas de soldagem, segundo o padrão americano. Considere as seguintes normas da AWS para especificação de eletrodo:

Figura | Designação para eletrodos sólidos revestidos (AWS A5.1) para aço carbono



Fonte: ESAB (2005, p. 11). Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 3 maio 2018.

Figura | Designação para eletrodos tubulares com núcleo (AWS A5.5) para aços de baixa liga



Fonte: ESAB. (2005, p. 23). Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 3 maio 2018.

Com base na norma da AWS, qual seria a especificação do eletrodo E70T-5? Assinale a alternativa correta.

- a) Eletrodo para metal de solda com força de tração de 7.000 psi, para solda na posição plana, de formato sólido, de usinabilidade de grau 5.
- b) Eletrodo para metal de solda com força de tração de 70.000 psi, para solda na posição horizontal, de formato tubular, de usinabilidade de grau -5.
- c) Eletrodo para metal de solda com força de tração de 7.000 psi, para solda na posição plana, de formato tubular, de usinabilidade de grau -5.
- d) eletrodo para metal de solda com força de tração de 70.000 psi, para solda na posição horizontal, de formato sólido, de usinabilidade de grau 5.
- e) Eletrodo para metal de solda com força de tração de 70.000 psi, para solda na posição plana, de formato tubular, de usinabilidade de grau 5.

Seção 1.2

Defeitos e qualidade em soldagem

Diálogo aberto

Caríssimo aluno, os conteúdos abordados nesta seção referem-se aos defeitos e à qualidade nos processos de soldagem, pois, em se tratando de um processo de fabricação mecânica, a soldagem está sujeita a defeitos na sua execução e, para evitar tais ocorrências, exige-se também um bom controle de qualidade, assim como em qualquer outro tipo de manufatura industrial.

Na sequência do programa de treinamento que você está conduzindo e desempenhando sua liderança junto aos funcionários da empresa, especificamente os soldadores, chegou o momento de avaliar a qualidade das soldas realizadas.

Lembre-se que uma grande empresa prestadora de serviços de soldagem está passando por um processo de reestruturação geral e você foi contratado como um consultor especializado em processos de soldagem, para isso, aplicará um programa de capacitação e treinamento dos novos funcionários da área de soldagem e da área de controle de qualidade. O programa tem três frentes: (i) abordagem de conceitos fundamentais de soldagem e normas de soldagem e segurança, (ii) defeitos e qualidade em soldagem, focados em técnicas de inspeção e critérios de qualidade e (iii) soldagem de ligas ferrosas e não-ferrosas. Você está na etapa de verificação dos defeitos e da qualidade em soldagem.

Sabe-se que a inspeção de solda envolve atividades relacionadas ao processo e aos equipamentos de soldagem, com o procedimento de soldagem, sua especificação, com a qualificação do soldador ou operador, com a metalurgia da soldagem e com os métodos de avaliação dimensional, visual e não destrutiva. A inspeção consiste em verificar as características da junta soldada bem como constatar a ocorrência de defeitos, como trincas, porosidade, falta de fusão, falta de penetração, inclusão de escória e mordedura.

No treinamento foram apresentadas três falhas de soldagem que, por inspeção visual, devem ser caracterizadas (identificadas) e,

além disso, deve-se propor soluções para essas falhas não ocorram. Antes de apresentar aos soldadores as imagens das possíveis falhas, cabe a você identificá-las, caracterizá-las e solucioná-las a fim de desenvolver sua liderança no processo de capacitação. A Figura 1.11 ilustra as possíveis falhas que podem ocorrer.

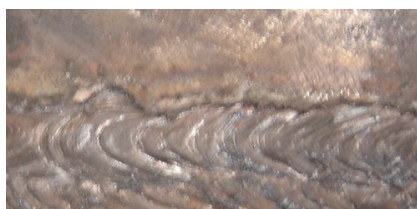
Figura 1.11 | Defeitos em soldas, avaliadas por inspeção visual



(a)



(b)



(c)

Fonte: <<http://www.alusolda.com.br/conteudo/defeitos-e-solucoes-mais-comuns-na-soldagem-eletrica.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Usando seus conhecimentos sobre defeitos em solda e em defeitos na ZTA (Zona Termicamente Afetada), você saberia diferenciar esses dois tipos de falhas? Seria capaz de citar um caso real de defeito de soldagem que tenha provocado um sério prejuízo, seja econômico ou social? No relatório a ser entregue ao contratante, devem constar as respostas dos participantes da capacitação sobre

os tipos de defeitos observados por inspeção visual, as possíveis causas de ocorrência desses defeitos e as possíveis soluções para evitar as mesmas ocorrências em situações reais futuras.

Considerando que os conteúdos abordados nesta seção se referem a defeitos em solda e qualidade em soldagem, esses assuntos lhe darão amplas condições para solucionar a problematização proposta. Tenha em mente que o profissional da área metal-mecânica que pretende trabalhar com soldagem deve conhecer profundamente os tipos de defeitos que surgem nesta operação e saber como lidar com esses defeitos buscando soluções e formas de evitá-los. Bons estudos!

Não pode faltar

Inspeção visual e dimensional: verificação durante e após a soldagem

A inspeção em solda é realizada por pessoas aptas para tal tarefa. Há diversos cursos no mercado para capacitação de profissionais de soldagem em inspetor de solda. A inspeção da soldagem, muito mais do que um simples procedimento de garantia de qualidade é também um procedimento de garantia de segurança.

A inspeção é importante para a qualidade porque por meio de uma análise sistêmica dos processos de soldagem, é possível evitar (ou pelo menos minimizar) a ocorrência de defeitos na soldagem de peças e produtos, que poderiam levar à reprovação de um produto/peça ou até um lote completo.

Na questão de segurança, muitas peças unidas por soldagem podem operar em ambientes agressivos que, por sua vez, podem afetar a integridade da solda, levando-as ao colapso ou falha das peças, o que pode ocasionar sérios danos materiais e até pessoais (físicos). Daí a necessidade de uma inspeção criteriosa. Há, portanto, uma série de ensaios visuais e dimensionais que caracterizam uma inspeção de solda.

Segundo Ferraresi (2014), a inspeção visual e dimensional em soldas é uma forma de garantir a integridade das juntas soldadas, sendo uma prática muito importante e bastante utilizada em controle de qualidade.

A inspeção visual é um procedimento de baixo custo, rápido e que não requer a utilização de um equipamento específico (muitas vezes caro). Ainda, segundo Ferraresi (2014), temos que:



- a) O ensaio visual é usado em soldas a fim de garantir:
- A preparação adequada da junta, ajustagem apropriada, conformidade com o procedimento, etc.;
 - O controle durante o processo de soldagem a fim de minimizar ou eliminar as descontinuidades;
 - A detecção de descontinuidades superficiais;
 - A conformidade dimensional das soldas, por exemplo, um desalinhamento da solda (desvio), um cordão de dimensão (visual) excessivo ou pequeno demais;
 - A conformidade das soldas com as especificações.
- b) O ensaio visual é usado em componentes fabricados ou itens a fim de determinar:
- A quantidade, tamanho e formato dos itens;
 - A presença de trincas e descontinuidades inaceitáveis expostas;
 - O cumprimento das especificações e códigos do processo de soldagem descritos nos desenhos de projeto da peça a ser soldada;
 - O cumprimento dos códigos e especificações com relação a embalagem ou carregamento para embarque dos itens.

(FERRARESI, 2014, p. 1)

Embora a inspeção visual seja barata, rápida e não exija equipamentos sofisticados, ela possui limitações, pois restringe somente a descontinuidades externas e exige habilidade do inspetor.

A inspeção deve ocorrer em três etapas: (1) antes da soldagem, (2) durante a soldagem e (3) após a soldagem. Vejamos cada uma delas, de acordo com Ferraresi (2014).

(1) Inspeção visual antes da soldagem: trata-se de uma etapa preliminar que exige a avaliação do material que vai ser soldado a fim de antever possíveis problemas e buscar evitá-los. Deve-se observar o tipo de material, o tipo de junta, as condições de limpeza da superfície e evitar ou eliminar óxidos, irregularidades, sujeiras, oleosidades, etc.

(2) Inspeção durante a soldagem: durante o processo de fabricação por soldagem, a inspeção se ocupa das seguintes variáveis: condições e processo de soldagem, tipo de eletrodo, fluxo ou gás de proteção, temperatura de interpasse e pré-aquecimento,

controle de distorção, sequência de passes e dimensões do cordão entre passes.

(3) Inspeção pós-soldagem: esta última etapa da inspeção visual tende a avaliar a junta a partir da verificação de possíveis desvios ou distorções, da aparência do cordão de solda (incluindo a rugosidade superficial, o nível de respingo, etc.) e da presença de descontinuidades superficiais (trinca, porosidade, mordeduras, etc.).

Na inspeção visual, o fator iluminação é determinante para uma boa qualidade de análise visual. Assim, para garantir uma boa iluminação (ou o controle dela), um dispositivo medidor de luz (fotocélula ou fotômetro) deve ser utilizado. No entanto, para a maioria das inspeções visuais, que são realizadas durante o dia aproveitando a luz solar, o máximo que se pode precisar é de uma lanterna auxiliar. Alguns acessórios podem ser úteis no processo de inspeção visual, dos quais destacamos lupas ou lentes de aumento e espelhos.

De acordo com Ferraresi (2014), no procedimento de inspeção visual de solda devem constar os seguintes itens:

(a) objetivo; (b) normas de referência; (c) método de ensaio; (d) estado disponível da superfície; (e) método de preparação da superfície; (f) condição superficial requerida para o ensaio; (g) iluminação requerida; (h) instrumentos; (i) inspeção (relação de descontinuidades, irregularidades a serem examinadas e/ou observações a serem efetuadas); (j) sequência do ensaio; (k) requisitos adicionais e; (l) sistemática de registro de resultados.
(FERRARESI, 2014, p. 6)



Reflita

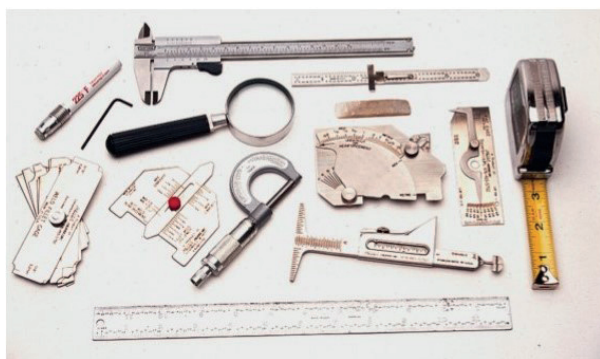
Caro aluno, vimos que no procedimento de inspeção visual o fator iluminação é determinante para uma boa qualidade de análise visual, assim como a experiência e habilidade do inspetor. No caso de defeitos microscópicos (por exemplo, micro trincas), como você imagina que deve ser o procedimento de inspeção?

Inspeção dimensional: como diz o nome deste tipo de inspeção, o objetivo dela é verificar se os seguintes requisitos dimensionais

geométricos da solda foram atendidos: profundidade da solda, largura e comprimento da solda, ângulos das juntas soldadas, ângulo de soldagem, etc.

Dentre os equipamentos utilizados para inspeção dimensional de soldas temos: régua graduada, lupa, paquímetros, micrômetros e calibres, máquinas fotográficas, tuboscópio, videoscópio e fibroscópio. A Figura 1.12 a seguir ilustra um kit completo de equipamentos para realização de uma inspeção dimensional em solda.

Figura 1.12 | Kit completo de acessórios para inspeção dimensional de soldas



Fonte: Ferraresi (2014, p. 8).

Defeitos em solda. Descontinuidade em juntas soldadas

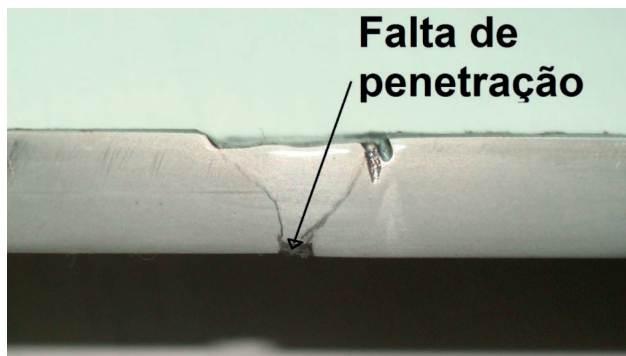
Assoldas podem apresentar defeitos que comprometem a qualidade e podem pôr em risco a peça soldada caso não sejam percebidos. Tais defeitos, também conhecidos como descontinuidades, podem ser classificados como defeitos por falta de penetração, falta de fusão, porosidades, mordeduras, trincas, inclusões de escórias e respingos. Vamos ver cada um deles separadamente:

(I) Defeitos por falta de penetração: é o tipo de defeito (descontinuidade) no qual o cordão de solda não conseguiu preencher completamente o espaço entre as juntas. Dentre as possíveis causas desse tipo de defeito, podemos citar a alta velocidade de soldagem, a baixa intensidade da corrente elétrica, o uso de eletrodo com diâmetro inadequado (bitola excessiva), arco muito longo e preparação inadequada da junta. Há, ainda, a possibilidade de ocorrer excesso de penetração.



Como exemplo de falta de penetração, vejamos o caso ilustrado na Figura 1.13 a seguir.

Figura 1.13 | Exemplo de falta de penetração em solda



Fonte: <<http://calculistadeaco.com.br/6-defeitos-comuns-em-soldas-de-eletrodo-revestido-e-como-evita-las/>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Neste exemplo, observamos a ocorrência de falta de penetração. Note que o metal de solda não atinge a raiz (base) total das peças soldadas. Esse tipo de descontinuidade contribui para a redução da resistência da união, podendo também permitir o aparecimento de corrosão. A falta de penetração ocorre, entre outras causas, devido a utilização de baixa corrente de soldagem (amperagem), afastamento excessivo da junta e velocidade de soldagem muito rápida.

(II) Defeito por falta de fusão: quando a corrente (amperagem) não é suficiente, o insumo de calor é menor e a capacidade de fundir o material soldado também diminui. Além disso, a utilização de uma velocidade de soldagem muito rápida também contribui para a falta de fusão. Uma boa regulagem da máquina de solda ajuda evitar esse tipo de defeito, além, é claro, da habilidade do soldador.

(III) Porosidade: esse tipo de defeito pode não ser percebido em uma inspeção visual, pois os poros podem se formar na parte interna do cordão de solda e a porosidade diminui a resistência da solda, tornando-a extremamente frágil. Alguns dos principais fatores que levam a esse tipo de descontinuidade são: comprimento excessivo do arco elétrico (ou seja, eletrodo posicionado longe do metal base), associado (ou não) a uma velocidade de solda elevada,

limpeza inadequada do metal base, que ajuda na formação de poros e utilização de eletrodos úmidos, que devem ser evitados.

(IV) Mordeduras: são defeitos de caráter geométrico ou pequenos vincos na solda provocados por insuficiência de penetração do metal de solda no metal base. Um dos maiores problemas das mordeduras é que elas são iniciadoras e propagadoras de trincas, além de ser o ponto preferencial para o surgimento de corrosão. Para evitar a ocorrência de mordedura, é recomendado diminuir a intensidade de corrente ou diminuir o comprimento do arco além de aumentar o ângulo do chanfro.

(V) Trincas: esse talvez seja o maior vilão entre as discontinuidades da solda, pois pode (tal como a porosidade) ocorrer tanto externamente quanto internamente à solda, diminuindo fortemente sua resistência podendo levá-la a colapso com facilidade. Dentre as causas que levam ao surgimento das trincas, destacam-se: utilização de eletrodo úmido, sujeiras na superfície da solda, comprimento excessivo do arco, diâmetro pequeno do eletrodo e, principalmente, resfriamento muito rápido da solda (choque térmico). Assim, para evitar a ocorrência de trincas, recomenda-se ressecar o eletrodo, limpar as peças a serem soldadas, encurtar o arco elétrico, utilizar um eletrodo com diâmetro adequado e controlar o resfriamento da solda.

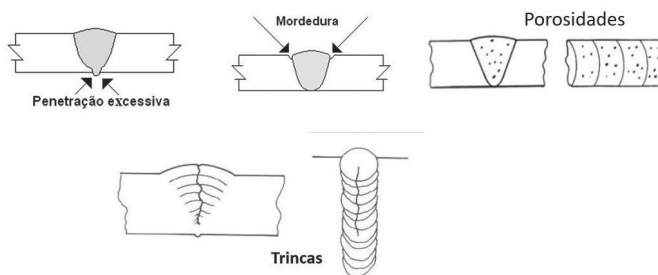
(VI) Inclusão de escória: esse é um tipo de defeito que ocorre quando não é realizada uma limpeza adequada (remoção) entre dois passes consecutivos da escória formada após o processo de soldagem. Sua ocorrência pode ser também observada quando o ângulo de soldagem ou o movimento do passe não for adequado, conduzindo a escória para a parte interna da solda. Para evitar inclusões de escória na solda, recomenda-se removê-la sempre entre dois passes ou entre trocas de eletrodos, não exceder na velocidade de soldagem e utilizar eletrodo com diâmetro adequado ao ângulo do chanfro.

(VII) Respingos: esse tipo de defeito ocorre tipicamente quando o soldador é inexperiente, ou seja, não tem domínio técnico do processo de soldagem. Quando a amperagem utilizada é muito elevada, o metal de solda (metal base + metal de adição) se funde mais rapidamente, podendo aparecer (respingar) pequenas esferas, chamadas respingos (gotas do metal de solda fundido) sobre as peças de base. Existe também a possibilidade do próprio metal de adição

se fundir muito rapidamente e respingar diretamente nas peças de base. No entanto, mesmo os soldadores experientes podem causar esse tipo de defeito quando a peça a ser soldada (e/ou o eletrodo) está úmida ou enferrujada, quando o arco de soldagem é longo demais e até quando houver interferência magnética (fenômeno conhecido por sopro, provocado por fios enrolados ou quando a peça não está devidamente isolada).

A Figura 1.14 ilustra cada um dos tipos de defeitos (descontinuidades) que podem ocorrer em um processo de soldagem.

Figura 1.14 | Principais defeitos (descontinuidades) em solda



Fonte: adaptada de SENAI (2015, p. 37).



Assimile

Os defeitos (ou descontinuidades) em soldas são problemas que devem ser evitados ao máximo, sendo, portanto, fundamental o controle do processo através de um sistema de gestão da qualidade. Lembre-se que, dentre os possíveis defeitos de uma solda, temos defeitos por falta de penetração, defeitos por falta de fusão, porosidade, mordeduras, trincas, inclusões de escórias e respingos.

Gestão da qualidade: gestão de processos, mapeamento de processos, não conformidades e ações corretivas

De acordo com a norma NBR ISO 9000 para sistemas de qualidade, a soldagem é um processo especial que, dependendo da complexidade e da responsabilidade da construção soldada, requer métodos de controle (abrangendo as atividades de projeto, de seleção dos materiais, de fabricação e de inspeção) a fim de garantir que a qualidade especificada seja atingida. Em outras palavras, isso significa que não é possível assegurar que o processo de soldagem seja satisfatório apenas pelo controle do produto final. Exige-se acompanhamento posterior, desenvolvimento e aprimoramento de

equipamentos e métodos de monitoramento, além da simplificação e segurança das etapas de soldagem para o próprio soldador (Moretti, [s.d.]).

Normas tais como a ISO 14731:2006 (*Welding coordination - Tasks and responsibilities*, ou em português Coordenação de soldagem - Tarefas e responsabilidades) estabelece os requisitos da qualidade para soldagem a partir da identificação das responsabilidades e tarefas relacionadas com a qualidade incluídas na coordenação de atividades relacionadas à soldagem. Porém, quando se trata de um facilitador para a gestão da qualidade, a norma ISO 3834:2005 (*Quality requirements for fusion welding of metallic materials* ou "Requisitos de qualidade para soldagem por fusão de materiais metálicos") traz uma padronização focada no produto soldado. Segundo essa norma, são definidos os requisitos para: qualidade para soldagem por fusão de materiais metálicos, características de operação, tarefas, níveis de preocupação dos processos, conhecimentos mínimos requeridos para os soldadores, responsabilidades e documentação, incluindo análise de parâmetros operacionais do processo (por exemplo, tensão, corrente, velocidade de alimentação, etc.). Moretti ([s.d]) afirma que a norma ISO 3834:2005 ainda é pouco conhecida e utilizada no Brasil.

Há vários problemas ou não conformidades que podem ocorrer em uma solda, como material base inadequado quanto à afinidade química, propriedades mecânicas, material de adição incompatível com o metal base, projeto inadequado da junta da solda, escolha inadequada do(s) processo(s) de soldagem e seus parâmetros, soldador com pouca habilidade ou mesmo soldador hábil que comete erros, falta de capacitação/treinamento para soldadores, utilização errônea do equipamento de soldagem, falta de limpeza e preparo inadequado das juntas, falha em tratamentos térmicos prévios ou pós soldagem, falhas do eletrodo, entre outras.

Para cada caso de não conformidade, há soluções individualizadas que podem ser resolvidas a partir de códigos, normas e especificações sob a forma de cuidados, recomendações ou mesmo exigências (BRANCHINI, 2015).

Um sistema típico de gestão da qualidade em soldagem envolve as seguintes etapas: planejar, executar e registrar. Vamos ver brevemente cada uma delas.

Planejar engloba desenhar a solda, realizar planos e especificações de soldagem, de tratamentos térmicos, planos sequenciais de fabricação e inspeção que devem ser aprovadas continuamente.

Na fase **executar** deve-se levar em conta a qualificação dos processos de soldagem, dos tratamentos térmicos, dos ensaios não-destrutivos para que o corpo de prova se aproxime o máximo possível das condições reais de soldagem. Tudo isso deve ser elaborado na fase inicial da execução, pois em sua plena operacionalização devem ser preparados testemunhos de soldagem e de tratamento térmico, permitindo a análise do que foi realizado.

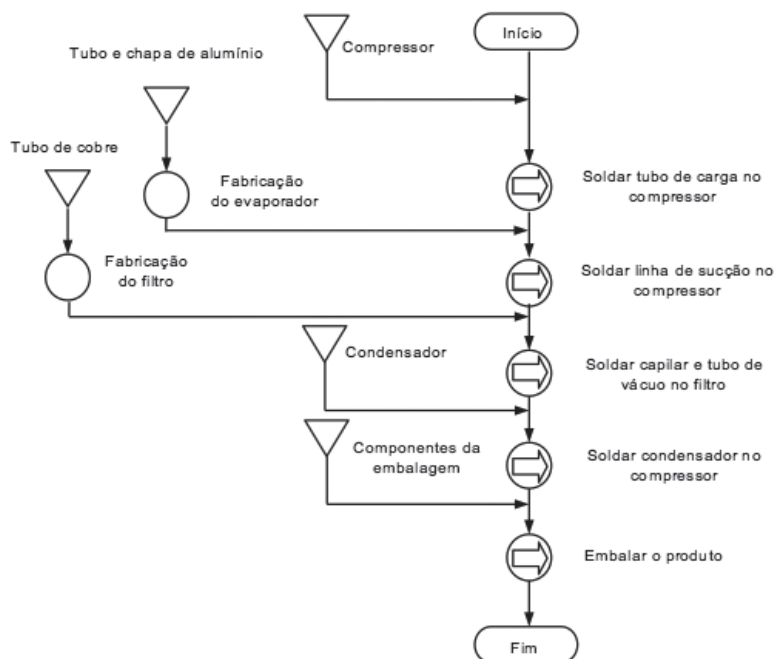
Na etapa **registrar**, caso alguma não conformidade seja observada, deve-se preparar um documento para fins de registro no qual serão relatados o desvio / defeito / não-conformidade, a correção (proposta e aceita) executada conforme recomendação, de modo a identificar todas as anomalias identificadas no processo (BRANCHINI, 2015). Afim de obter-se rastreamento da produção do produto soldado é importante registrar de forma adequada e por completo todos os parâmetros importantes durante o preparo a execução e o controle do elemento soldado, assim como ter um sistema de arquivamento e guarda seguro de todo este histórico.

O Mapeamento de Processos é uma técnica geral utilizada por empresas para entender de forma clara e simples como uma unidade de negócio está operando (no caso da solda, poderia ser o setor de soldagem), representando cada passo de operação dessa unidade em termos de entradas, saídas e ações. Esse exercício de compreensão e documentação é fundamental para a implementação de diversas metodologias de melhoria de processos e padronização. Temos que, a partir de um mapeamento bem estruturado do processo, as sugestões de melhoria e os pontos de atuação dessas metodologias podem ser elencados e observados mais detalhadamente.

Vale destacar, caro aluno, que existem ferramentas que analisam o fluxo de valor, como o VSM – *Value Stream Mapping* - Mapeamento do Fluxo de Valor (que inclui tempos de operação e se agregam ou não valor a operação). Este tipo de ferramenta vê um pouco além do fluxo de processo, gerando um mapa atual e um futuro e promove uma análise crítica do processo. Assim, mapear um processo de soldagem é o mesmo que criar um organograma de todas as etapas

que envolvem a operação de soldagem. A Figura 1.15 mostra um organograma de mapeamento de processo.

Figura 1.15 | Mapeamento de processos de soldagem



Fonte: <<http://www.revistaespacios.com/a15v36n09/15360905.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.



Pesquise mais

Para ampliar seus conhecimentos nesse tópico, recomenda-se a consulta do Capítulo 10 do livro da seguinte obra:

BRANCHINI, O. J. G. Garantia de qualidade na soldagem. In: WEINER, Emilio et al. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015, p.441-447.

Critérios de qualidade de solda, segundo a AWS

A profissão de soldador e sua qualificação pela AWS como inspetor de soldagem obedece à norma AWS QC1:2007 *Standard for AWS Certification of Welding Inspectors* ou Norma para Certificação AWS de Inspectores de Soldagem (que substituiu a norma AWS QC1:2006).

Segundo a AWS, temos que,

[...] esta norma define os requisitos e programa para a *American Welding Society* certificar inspetores de soldagem. A certificação de inspetores visuais de soldagem requer a documentação da sua experiência, cumprimento satisfatório de um exame e prova de acuidade visual. O exame testa os conhecimentos dos inspetores em processos de soldagem, procedimentos de soldagem, ensaios destrutivos, termos, definições, símbolos, relatórios, segurança e responsabilidades. (AWS, 2007, p. 1)



No Brasil, temos a NBR 14842, intitulada *Critérios para a qualificação e certificação de inspetores de soldagem*, que trata dos critérios para a qualificação e certificação de inspetores de soldagem (ABNT, 2003). Essa Norma discrimina os níveis de qualificação, experiência profissional e escolaridade necessários, requisitos, conhecimentos exigíveis, exame de qualificação, certificação, dentre outros.

Falando especificamente em critérios de qualidade de solda, a AWS possui duas normas muito importantes que são as seguintes: AWS D1.1 *Structural Welding Code – Steel* (estruturas soldadas de aço carbono e de baixa liga) e AWS D1.2 *Structural Welding Code – Aluminum* (estruturas soldadas em Alumínio).

Segundo Modenesi (2005), estas normas podem cobrir as mais diferentes etapas de soldagem, incluindo, por exemplo, a especificação de material (metal de base e consumíveis), projeto e preparação da junta, fabricação de estruturas e equipamentos, qualificações de procedimento e de operador, procedimentos de inspeção e avaliação de descontinuidades.

Sem medo de errar

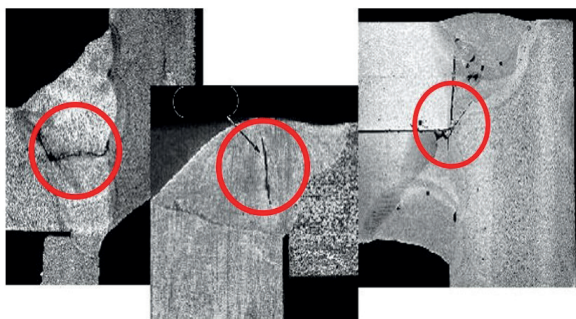
Caro aluno, lembre-se que uma grande empresa prestadora de serviços de soldagem está passando por um processo de reestruturação geral e você foi contratado como um consultor especializado em soldagem a fim de aplicar um treinamento de capacitação aos soldadores. Nesta fase da capacitação, chegou a hora de avaliar os tipos de defeitos e qualidade em soldagem, utilizando técnicas de inspeção e critérios de qualidade.

No treinamento foram apresentadas três falhas de soldagem que, por inspeção visual, devem ser caracterizadas (identificadas) e, após sua identificação, deve-se propor soluções para sua não ocorrência. Antes de apresentar aos soldadores, cabe a você identificá-las, caracterizá-las e solucioná-las para desenvolver sua liderança no processo de capacitação.

Iniciando a resolução da problematização proposta, vamos ver as situações, caso a caso.

No primeiro caso, ilustrado na Figura 1.11 (a), fica evidente por inspeção visual que o principal defeito observado é uma trinca no cordão de solda. A provável causa da ocorrência desse defeito é o rápido resfriamento do cordão de solda. Pode-se observar na imagem do meio que a trinca está localizada bem no centro da solda, bem como sua ampla propagação ao longo da mesma. Na solda à esquerda, a trinca corta transversalmente o cordão de solda, enquanto na imagem da direita, a trinca se propaga lateralmente ao longo da ZTA.

Figura 1.11 | (a) Defeitos em soldas avaliadas por inspeção visual



Fonte: adaptada de <<http://www.alusolda.com.br/conteudo/defeitos-e-solucoes-mais-comuns-na-soldagem-eletrica.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

A trinca interna reduz a resistência da união e pode ocorrer no final do cordão (passe), quando o arco é fechado bruscamente (daí o resfriamento rápido da solda).

A trinca observada pode ter ocorrido devido ao fato de a peça possuir teor de carbono e enxofre muito altos, então, ela pode ter sido originada na solidificação, devido a composição química, como visto nas disciplinas de Ciências dos Materiais e Materiais de Construção Mecânica.

Para evitar esse tipo de defeito, a experiência do soldador é um fator importante. Assim, sempre que terminar um cordão, o soldador deve evitar fechar o arco bruscamente. Outra possibilidade é utilizar eletrodos secos e pré-aquecidos em estufa. Evitar o resfriamento brusco da solda é outra medida recomendável.

O segundo tipo de defeito, ilustrado na Figura 1.11 (b), é característico dos respingos. Note que, lateralmente ao cordão de solda, há uma série de pequenos pontos (gotículas solidificadas) que tornam o aspecto final da solda não conforme, ou seja, malfeita, com defeitos, e afetam a solda em termos de resistência mecânica. Provavelmente, a amperagem foi regulada de forma errada (elevada), aumentando a taxa de fusão do metal base e provocando os respingos laterais.

Figura 1.11 (b): Defeitos em soldas, avaliadas por inspeção visual.



Fonte: <<http://www.alusolda.com.br/conteudo/defeitos-e-solucoes-mais-comuns-na-soldagem-eletrica.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Outros fatores que podem colaborar para a ocorrência de respingos são umidade ou ferrugem na peça base, umidade elevada do eletrodo ou eletrodo muito afastado do metal base (arco longo demais).

Uma possível solução para esse tipo de problema é a utilização de uma corrente (amperagem) mais baixa (fazendo testes preliminares) até que se atinja o ponto ideal de fusão do metal sem gerar respingos. Essa solução funciona muito bem caso o soldador tenha pouca experiência.

O terceiro defeito de solda, ilustrada na Figura 1.11 (c), que é facilmente identificado por inspeção visual, é conhecido como mordedura. O que pode ser a causa desse tipo de defeito é corrente elevada, arco longo (eletrodo afastado da peça), manejo incorreto do eletrodo, velocidade de soldagem rápida demais, chanfro estreito demais, além de outros. Observe que o cordão de solda fica com um aspecto “pastoso”.

Figura 1.11 | (c) Defeitos em soldas, avaliadas por inspeção visual



Fonte: <<http://www.alusolda.com.br/conteudo/defeitos-e-solucoes-mais-comuns-na-soldagem-eletrica.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Para evitar esse tipo de falha recomenda-se limpeza, estufa e controle de corrente e velocidade de soldagem adequada.

Lembre-se que haviam duas questões a serem respondidas nesta problematização, a primeira é: falamos em defeitos em solda e em defeitos na ZTA – zona termicamente afetada – usando os seus conhecimentos, você saberia diferenciar esses dois tipos de defeitos? Temos que os defeitos na solda se referem àqueles que ocorrem no cordão de solda (trata-se dos principais tipos de defeitos que aqui estudamos: porosidade, trinca, respingos, falta de penetração, etc.); os defeitos observáveis na ZTA estão mais relacionados a fatores termo-metalúrgicos, como trincas devido a resfriamento brusco da solda, o que também afeta a ZTA. Há, ainda sobre ZTA, a possibilidade de contaminação por difusão de elementos da poça fundida para a ZTA e a ocorrência de respingos nela, visto que é muito próxima da região soldada.

Referente ao segundo questionamento: você seria capaz de citar um caso real de defeito de soldagem que tenha provocado um sério prejuízo, seja econômico ou social? Cabe aqui, como resposta, algum caso vivenciado pelos funcionários ou a realização de uma pesquisa na internet sobre o tema em questão.

Veja, caro aluno, que para resolver esta problematização você teve que passar por todo o conteúdo desta seção, ressaltando a importância do auto estudo.

Veja que a solução aqui encontrada está aderente com os resultados de aprendizagem esperados nesta seção "(...) *conhecer as características da zona fundida e ZTA, distinguir os defeitos de descontinuidades comuns em solda, (...)*".

Finalizando o seu trabalho, no relatório a ser entregue ao contratante devem constar as respostas dos participantes da

capacitação sobre os tipos de defeitos observados por inspeção visual, as possíveis causas de ocorrências e as possíveis soluções para evitar as mesmas ocorrências em situações reais no futuro.

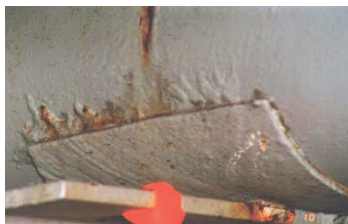
Avançando na prática

Inspeção visual em uma solda reparada

Descrição da situação-problema

Em um trecho de uma tubulação que sofreu reparos de solda recentemente, observa-se novamente vazamento de fluido que é transportado através dela. Na região em que ocorreu a solda, observou-se o que se mostra na Figura 1.16.

Figura 1.16 | Dano na solda de reparo de tubulação



Fonte: <<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014/01/caso-055-corrosao-por-fresta-em.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Você foi designado para fazer uma avaliação visual da possível causa do novo vazamento na região da solda e enviar um relatório para sua gerência.

Resolução da situação-problema

Considerando a situação apresentada, observa-se preliminarmente que a região de vazamento está com uma forte incidência de óxido, representada pela região vermelho-escuro no contorno. Não há informação sobre qual é o tipo de fluido que escoia pela tubulação e nem qual é o material do tubo, sendo que a falta dessas informações restringe um pouco a avaliação do problema.

Por outro lado, é possível que antes da realização do reparo, a região a ser soldada não tenha sido limpa adequadamente. Assim, eventuais sujeiras residuais podem ter comprometido a qualidade final da solda. Existe ainda a possibilidade de haver umidade excessiva na zona de vazamento que não foi eliminada. A umidade, além de ter comprometido a qualidade da solda, contribuiu para a ocorrência

de ferrugem (óxido) no local reparado. Deve-se considerar também a possível falta de habilidade do soldador, dada a posição em que a solda foi realizada (as possíveis posições de soldagem são: plana, horizontal, vertical e sobre-cabeça).

Outra possibilidade reside no uso inadequado dos parâmetros básicos de soldagem: amperagem, eletrodo, velocidade de soldagem, regulagem da máquina de solda, comprimento do arco, etc.

Assim, sendo uma inspeção apenas visual, as observações aqui registradas deverão compor o relatório a ser entregue à gerência para tomada de decisão a respeito de um novo reparo.

Por fim, seu parecer, a constar no relatório, deve apontar que a região de vazamento está com uma forte incidência de óxido, além de apontar que a falta de informações sobre o fluido que escoou na tubulação restringe um pouco a avaliação do problema e que as possíveis causas da falha da solda são as seguintes: (I) antes da realização do reparo, a região a ser soldada talvez não tenha sido limpa adequadamente, (II) existe a possibilidade de haver umidade excessiva na zona de vazamento que não foi eliminada, (III) deve-se considerar também a possível falta de habilidade do soldador e (IV) uso inadequado dos parâmetros básicos de soldagem: amperagem, eletrodo, velocidade de soldagem, regulagem da máquina de soldar, comprimento do arco e outros.

Faça valer a pena

1. Dentre as descontinuidades características dos processos de soldagem, as trincas talvez sejam as mais nocivas, pois podem ocorrer tanto externamente quanto internamente ao cordão, diminuindo fortemente sua resistência mecânica, podendo levá-la ao colapso com facilidade. Há diversas causas que levam ao surgimento das trincas, por exemplo o uso de eletrodo úmido, sujeiras na superfície da solda, comprimento excessivo do arco, diâmetro pequeno do eletrodo e resfriamento muito rápido da solda. Tem-se que, desses exemplos, um se destaca dentre os demais.

Analisando o texto-base, qual das possíveis causas de trincas em solda é a mais destacada? Assinale a alternativa correta.

- | | |
|-------------------------------------|---|
| a) Uso de eletrodos úmidos. | d) Comprimento excessivo do arco. |
| b) Sujeiras na superfície da solda. | e) Uso de eletrodo de diâmetro pequeno. |
| c) Resfriamento muito rápido. | |

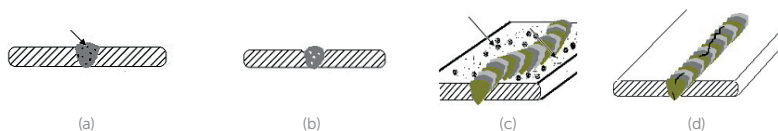
2. A _____ é realizada por profissionais capacitados para tal tarefa. Muito mais do que um simples procedimento de _____, é também um procedimento de garantia de segurança. Há, portanto, uma série de ensaios _____ que podem (e devem) ser realizados, pois são uma forma de garantir a integridade das _____ que _____ equipamento específico.

Assinale a alternativa que contém os termos que preenchem corretamente a frase:

- a) soldagem – união – visuais e microscópicos – partes – requer.
- b) inspeção em solda – garantia de qualidade – mecânicos e químicos – juntas soldadas – requer.
- c) soldagem – junção de juntas – visuais e dimensionais – ZTA – não requer.
- d) inspeção em solda – garantia de qualidade – visuais e dimensionais – juntas soldadas – não requer.
- e) inspeção em solda – avaliação da ZTA – visuais e dimensionais – juntas soldadas – requer.

3. Defeitos são sempre indesejados, principalmente em um processo de soldagem. Na soldagem, esses defeitos afetam a integridade da solda, o que pode ocasionar falta de segurança no emprego da peça final. A Figura 1.17 ilustra quatro tipos de defeitos que podem ocorrer em soldagem.

Figura 1.17 | Tipos de defeitos em soldagem



Fonte: <http://www.servsolda.com.br/v/index.php?option=com_content&task=view&id=116&Itemid=13>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Assinale a alternativa correta que corresponde, de acordo com a Figura 1.17 do texto-base, aos tipos de defeitos em (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

- a) Inclusões – porosidade – escória – trincas.
- b) Porosidade – inclusões – respingos – escória.
- c) Inclusões – porosidade – respingos – trincas.
- d) Porosidade – trincas iniciais – escória – inclusões.
- e) Inclusões – escória – respingos – trincas.

Seção 1.3

Termodinâmica da soldagem e soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas

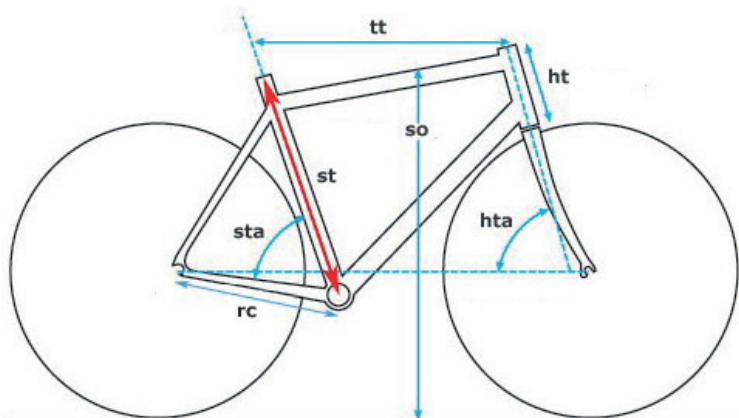
Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção você estudará sobre a termodinâmica da soldagem e conhecerá as características desse importante processo de fabricação. Por exemplo, calor, temperatura, gases e fluxo serão trabalhados na soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas, pois consideramos que essas variáveis afetam a qualidade do produto final.

Finalizando o treinamento/capacitação dos soldadores da empresa que o contratou, você tratará da soldagem de ligas ferrosas e de ligas não ferrosas. Para tanto, você usará o exemplo de um quadro de bicicleta, mostrado na Figura 1.18. Uma das características mais importantes que determinam a qualidade de uma bicicleta é o material que constitui o seu quadro e, como sabemos, ele é fabricado pela união (soldando) de suas partes.

Logo, suponha que você tenha de escolher entre três materiais para o quadro de uma bicicleta a ser construída: a) aço carbono AISI 1020; b) um aço Cr-Mo AISI 4130, baixa liga e alta resistência; e c) uma liga de alumínio AA6061. Todos são aptos para a utilização no quadro da bicicleta, mas a escolha deve recair na liga que tenha melhor aderência à solda, ofereça melhor resistência mecânica e custo compatível com o mercado consumidor. Com seu espírito de liderança, raciocínio crítico e de solução de problemas, você deverá sugerir aos soldadores em capacitação que elaborem um relatório comparando as características de soldagem de cada um desses três materiais, finalizando-o com a indicação de um desses materiais e a justificativa de sua escolha.

Figura 1.18 | Esquema de um quadro de bicicleta



Fonte: <<http://www.escoladebicicleta.com.br/geometria.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Embora você tenha trabalhado com as três ligas citadas, você teria condições de indicar uma quarta liga para o quadro da bicicleta? Qual seria essa liga? Comparando com as três ligas aqui elencadas, porque essa quarta liga também seria viável para o quadro da bicicleta? Ao final dessa última etapa da capacitação, você deverá entregar ao seu contratante um relatório contendo a resposta dos funcionários (soldadores) à situação apresentada. Note que, para solucioná-la, você mobilizará todos os conhecimentos adquiridos nesta unidade. Perceba que estamos tratando de uma combinação de duas fontes de conhecimento importantes para um profissional da área metal-mecânica, indispensáveis para sua atuação no mercado de trabalho: a soldagem e a seleção de materiais.

Bons estudos!

Não pode faltar

Termodinâmica da soldagem: calor, temperatura, gases e fluxo

Considerando que a soldagem é um processo de união de materiais que envolve um considerável insumo de calor, é natural que o estudo dos fenômenos termodinâmicos (associados aos fenômenos metalúrgicos) seja de fundamental importância para a compreensão do processo de soldagem.

Embora seja uma variável indispensável ao processo de soldagem, o calor é um elemento que pode ser gerador potencial de problemas (ou dificuldades) para a união de duas peças, visto que ele exerce grande influência nas características metalúrgicas e mecânicas finais do produto.

Segundo Taniguchi (2015, p. 359), os fatores a seguir devem ser considerados no estudo de transferência de calor em juntas soldadas:

- Aporte de calor ou de energia à junta soldada, também denominado insumo de calor ou energia.
- Rendimento térmico do arco elétrico.
- Distribuição e picos de temperatura (ciclo térmico) durante a soldagem.
- Tempo de permanência nessas temperaturas.
- Velocidade de resfriamento da zona de solda.

No processo de soldagem utilizando um eletrodo (revestido ou não), forma-se um arco elétrico. A energia dissipada por esse arco se divide em três partes: uma na forma de calor irradiante (na atmosfera), uma por convecção (no meio gasoso) e a terceira que é, de fato, usada na realização da soldagem. Há, portanto, perdas de energia (calor) no processo de soldagem, que podem ser medidas por um parâmetro chamado de "eficiência do arco" (e_a), definido por:

$$e_a = \frac{Q_l}{V.I}$$

sendo que e_a é a eficiência do arco (%); Q_l é a energia líquida disponível [W]; V é a tensão do arco [volts]; e I é a corrente de soldagem [A].

A energia total (Q_T) fornecida ao arco é dada por:

$$Q_T = V.I$$

Há ainda um outro parâmetro termodinâmico chamado "aporte de energia" ou "aporte de calor", simbolizado pela letra H . O aporte de calor é, por definição, a relação entre a quantidade de energia disponível para a soldagem com a velocidade de avanço (v) do eletrodo (fonte de calor). Assim:

$$H_T = 60. \frac{V.I}{v}$$

$$H_l = 60 \cdot \frac{e_a \cdot V \cdot I}{v} = e_a \cdot H_T$$

em que H_T é o aporte de energia total [J/cm] e H_l é o aporte de energia líquido [J/cm].



Reflita

Uma solda ideal é aquela na qual, entre outras variáveis, o resfriamento é controlado. Dessa forma, todas as regiões afetadas pelo calor apresentam um equilíbrio estrutural metalúrgico, garantido pela termodinâmica do processo. Por outro lado, caso o resfriamento ocorra de forma mais rápida do que a desejada, quais implicações metalúrgicas seriam previstas para esse desbalanceamento termodinâmico?

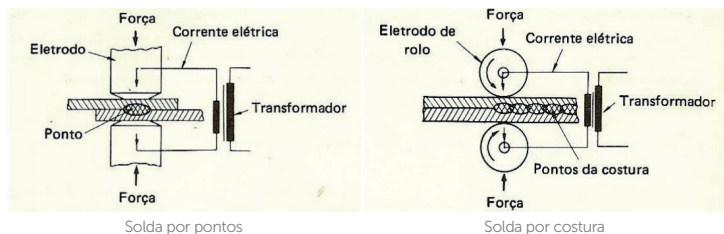
A soldagem como processo de fabricação: aspectos gerais

Ao contrário dos tradicionais processos de fabricação que se enquadram em uma classificação específica, como a conformação mecânica (forjamento, laminação, extrusão e trefilação), a fundição (em areia, cera perdida, etc.) e a usinagem (torneamento, fresamento, furação, etc.), a soldagem pertence a uma classificação extra: processos metalúrgicos envolvendo fusão/solidificação localizada, sendo considerada como um processo de fabricação que visa unir duas peças (partes) para formar um conjunto único.

A grande vantagem da soldagem é a possibilidade de se obter uma união em que os materiais têm uma continuidade não só na aparência externa, mas também nas suas características e propriedades mecânicas e químicas, relacionadas à sua estrutura interna (GOMES, [s.d.], p. 6).

Vale salientar que a soldagem não ocorre somente por fusão dos metais envolvidos; além do calor, há a possibilidade de realizar a união por pressão. A seguir, a Figura 1.19 ilustra a soldagem por pressão em dois momentos: a solda por pontos e a soldagem por costura.

Figura 1.19 | Solda por pressão



Fonte: <https://professormarciojomes.files.wordpress.com/2008/09/aulas-10-e-11-soldagem_12.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2018.

A soldagem como processo de fabricação pode ser dividida, a princípio, em duas categorias: a soldagem tradicional (aquela realizada em oficinas de soldagem, em geral, ou mesmo em setores específicos das indústrias metalúrgicas) e os processos automatizados (adotados pela indústria automotiva e naval, por exemplo).

A soldagem tradicional, mostrada na Figura 1.20, envolve processos de fabricação com atuação do soldador profissional, seja em reparos, seja na soldagem de peças de pequeno a grande porte realizadas manualmente. A qualidade da solda é muito dependente da habilidade do soldador.

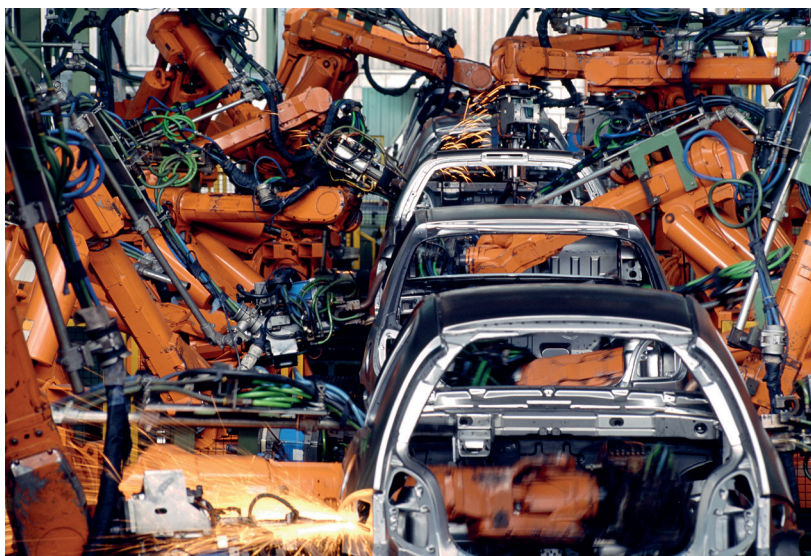
Figura 1.20 | Soldagem tradicional



Fonte: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/solda-e-tratamentos-superficiais/>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

A soldagem automatizada envolve operações realizadas, geralmente, por robôs pré-programados para tal. Um exemplo típico é a linha de montagem de veículos, mostrada na Figura 1.21 a seguir.

Figura 1.21 | Soldagem automatizada em linha de montagem automotiva



Fonte: iStock.

Soldagem de ligas ferrosas: visão geral introdutória

As ligas ferrosas são basicamente os aços (com teores de carbono de até 2,0%) e os ferros fundidos (com teores de carbono acima de 2% e abaixo de 4,5%). O carbono é um elemento químico que tem forte influência na soldagem de ligas ferrosas: quanto maior o teor de carbono, mais difícil é a realização da solda, pois ele afeta diretamente a dureza da liga Fe-C. Além disso, a temperatura de fusão de aços com elevado teor de carbono é mais elevada do que a temperatura de fusão dos aços de médio e baixo carbono.

O cálculo do carbono equivalente (CE) é empregado para relacionar a temperabilidade do aço e a sua soldabilidade: quanto maior o seu valor, mais temperável será o aço e pior a sua soldabilidade (WAINER et al., 2015, p. 423).

Assim, para muitas ligas Fe-C recomenda-se calcular o carbono equivalente (CE) com o objetivo de estimar-se quais cuidados são necessários para a realização da solda. Uma expressão para cálculo de carbono equivalente (CE) é a seguinte:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3}$$

Note que o cálculo do carbono equivalente (CE) é válido para aços ligados (preferencialmente). A fórmula aqui apresentada para o cálculo do CE é apenas uma entre outras fórmulas previstas na literatura (vide Infosolda, que fornece a fórmula indicada pela IIW – Instituto Internacional de Soldagem, disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/metalurgia/130-carbono-equivalente.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018). A escolha da fórmula mais apropriada depende um pouco da experiência do profissional e também deve se levar em conta a composição química do aço (ou aço-liga) quanto ao teor de carbono e seus elementos de liga, visando avaliar sua temperabilidade e soldabilidade.

Vale destacar que, quando é mencionada a necessidade de “estimar cuidados especiais para a realização da solda”, isso significa, por exemplo, a realização de um pré-aquecimento no material a ser soldado ou até um tratamento térmico prévio. As recomendações são:

- Para $CE < 0,40$, o aço é considerado facilmente soldável.
- Quando $CE > 0,60$, deve-se usar pré-aquecimento para juntas acima de 20 mm.
- Quando $CE > 0,90$, um pré-aquecimento a uma temperatura elevada é absolutamente necessário em todos os casos, exceto no das juntas de espessura muito pequena.



Exemplificando

Considere o aço-liga SAE 4340 com a seguinte composição química: 0,40% C – 0,70% Mn – 0,03% P – 0,035% S – 0,30% Si – 1,90% Ni – 0,85% Cr – 0,25% Mo. Calcule o seu carbono equivalente e classifique sua soldabilidade.

Resolução:

Vamos aplicar a seguinte equação de carbono equivalente:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3}$$

$$CE = 0,40 + \frac{0,70}{6} + \frac{0,25}{4} + \frac{0,85}{5} + \frac{1,90}{15} + \frac{0}{15} + \frac{0,03}{3}$$

$$CE = 0,40 + 0,11 + 0,06 + 0,17 + 0,12 + 0 + 0,01$$

$$CE = 0,87\%C$$

Sendo o $CE > 0,60$, o aço SAE 4340 é soldável, porém recomenda-se um pré-aquecimento antes da realização da solda. A temperatura de pré-aquecimento vai depender da espessura da chapa a ser soldada.

A Tabela 1.1, a seguir, mostra as temperaturas de pré-aquecimento recomendadas para aços e ferro fundido antes de se realizar o processo de soldagem.

Tabela 1.1 | Temperaturas de pré-aquecimento (recomendadas) para diferentes tipos de aço e ferro fundido

Liga Fe-C	Temperatura pré-aquecimento ($^{\circ}C$)
Aço baixo carbono ($\%C < 0,30$)	90 – 150
Aço médio carbono ($0,3 < \%C < 0,55$)	150 – 260
Aço alto carbono ($0,5 < \%C < 0,83$)	260 – 430
Aço C-Mo ($0,1 < \%C < 0,3$)	150 – 320
Aço C-Mo ($0,3 < \%C < 0,35$)	260 – 430
Aço ao Ni ($< 3,5\% \text{ Ni}$)	90 – 370
Aço Cr	150 – 260
Aço Cr-Ni	90 – 590
Ferro fundido	370 – 480

Fonte: <<http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo139.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

A soldagem dos ferros fundidos tem algumas peculiaridades que tornam difícil (mas não impossível) a sua soldagem, por exemplo:

- Elevada concentração (teor) de carbono e de elementos tais como fósforos e enxofre.
- Formação do microconstituente cementita (Fe_3C) na região da solda.
- Baixa ductilidade do ferro fundido.

- Estrutura porosa (ferros fundidos cinzento, maleável e nodular), o que favorece a absorção de impurezas.

Apenas os ferros fundidos brancos não são soldáveis, em função da sua elevadíssima fragilidade (excesso de carbono).



Assimile

A soldabilidade dos aços carbono de baixa e média liga está bastante associada à presença de trinca a frio induzida por hidrogênio. Como estão relacionadas à microestrutura na junta soldada, essas trincas são determinadas pela composição química do material. Em outras palavras, a soldabilidade é relacionada com a temperabilidade de um aço; assim, quanto maior for a temperabilidade do aço, maior a probabilidade de ocorrência dessas trincas. A temperabilidade é ditada basicamente pelo teor de carbono e pelos elementos de liga: quanto menores esses teores, menores cuidados serão necessários para soldar um aço (PORTAL BRASILEIRO DE SOLDAGEM – INFOSOLDA).

Soldagem de ligas não ferrosas: aspectos gerais

Vamos nos ater a duas classes que são as mais utilizadas em manufatura de soldagem de ligas não metálicas: as ligas de alumínio e as ligas de cobre.

1. Alumínio e suas ligas:

O alumínio e suas ligas apresentam características físicas e químicas que os tornam aptos a serem soldados, porém apresentam características muito diferentes das ligas Fe-C (ligas ferrosas): o alumínio tem grande afinidade com o oxigênio, elevada condutividade térmica, elevado coeficiente de expansão térmica e baixo ponto de fusão (em torno de **660°C**).

Quando se solda alumínio, é comum a aplicação de um pré-aquecimento (não superior a **200°C**) para juntas de grandes espessuras, a fim de evitar problemas de falta de fusão. A ocorrência de porosidades, formação de trincas de solidificação e perda de resistência mecânica são três problemas que podem ocorrer na soldagem de ligas de alumínio.

Na soldagem desse tipo de ligas, usa-se como gás de proteção o argônio, o Hélio ou uma mistura desses dois gases.

Além do processo de soldagem conhecido como MIG/MAG, outros processos usados na soldagem do alumínio são: a soldagem

com eletrodo revestido, o plasma, a soldagem a gás e os processos de soldagem por resistência.

2. Cobre e suas ligas:

O cobre apresenta um comportamento peculiar quando soldado, devido, principalmente, às seguintes propriedades desse metal:

- Elevada condutividade térmica.
- Elevado coeficiente de expansão térmica.
- Tendência a se tornar frágil a altas temperaturas.
- Ponto de fusão relativamente baixo.
- Baixa viscosidade do metal fundido.
- Elevada condutividade elétrica.
- Resistência mecânica, para várias ligas, baseada principalmente no encruamento.

Considerando que no processo de soldagem a arco atinge-se temperaturas elevadíssimas, não se deve soldar ligas de cobre e zinco por esse método, porque pode levar à vaporização do zinco na poça de fusão.

Na soldagem de ligas de cobre e zinco também são utilizados os gases argônio, hélio e suas misturas na proteção da solda. Os métodos TIG e MIG/MAG são os mais utilizados na soldagem dessas ligas, sendo o segundo usado na soldagem de peças de espessura maior.

Tal qual as ligas de alumínio, as ligas de cobre requerem um pré-aquecimento (em torno de 400°C , portanto maior do que a do alumínio) para a soldagem de uma junta de 12 mm de espessura.



Pesquise mais

Até o momento, vimos a soldagem de ligas não ferrosas: ligas de alumínio e ligas de cobre. Procure aprofundar o seu conhecimento sobre a soldagem de ligas de alumínio. Para tanto, sugerimos a leitura do material a seguir.

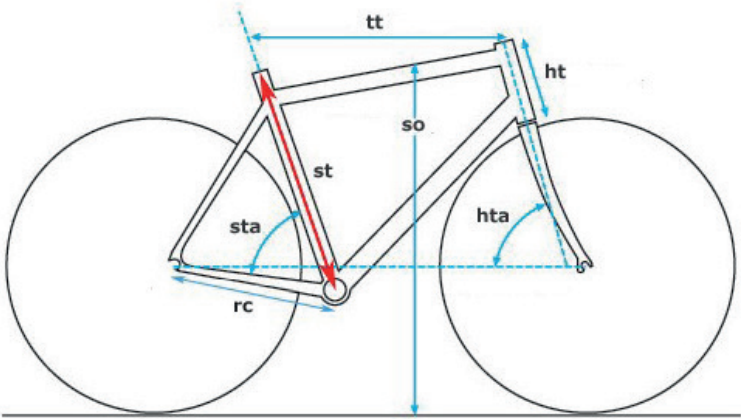
CANALE, Lauralice. **Ligas de alumínio**. 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/305685/mod_resource/content/1/Aula_12_Ligas%20de%20Alum%C3%ADnio%20Lauralice.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Boa leitura!

Sem medo de errar

Lembramos que você está finalizando o treinamento/capacitação dos soldadores da empresa que o contratou e, nesse momento, tratará da soldagem de ligas ferrosas e de ligas não ferrosas. Para tanto, você explorou o exemplo de um quadro de bicicleta, mostrado na Figura 1.18. As opções para o quadro da bicicleta são as seguintes: a) aço carbono AISI 1020; b) aço Cr-Mo AISI 4130 e; c) liga de alumínio AA6061.

Figura 1.18 | Esquema de um quadro de bicicleta



Fonte: <<http://www.escoladebicicleta.com.br/geometria.html>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

Como não foram fornecidas as composições químicas de cada liga, será necessário estimar a composição delas, consultando um *Metals Handbook* (livro especializado em aços comuns, ligas ferrosas e não ferrosas) ou, não tendo tal obra em mãos, consultar a internet. Realizada essa consulta, obtém-se as seguintes composições:

Tabela 1.2 | Composição química (%) das ligas sugeridas

Liga	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
1020 ⁽¹⁾	0,17 – 0,23	0,30 – 0,60	0,04 (mx)	0,05 (mx)	-	-	-
4130 ⁽²⁾	0,30 – 0,37	0,50 – 0,90	0,035	0,035	0,15 – 0,30	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25
AA6061 ⁽³⁾	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: (1) <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=243>>; (2) <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=269>>; (3) Liga Al-Mg-Si (forma o composto intermetálico Mg₂Si – responsável pelo endurecimento/envelhecimento dessas ligas). Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metals-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=54>>. Acessos em: 15 jun. 2018.

Fazendo o cálculo do carbono equivalente (usando a composição no limite máximo) das duas ligas Fe-C, temos:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3}$$

$$CE(1020) = 0,23 + \frac{0,60}{6} + \frac{0}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{15} + \frac{0}{15} + \frac{0,04}{3} = 0,34$$

$$CE(4130) = 0,37 + \frac{0,90}{6} + \frac{0,25}{4} + \frac{1,10}{5} + \frac{0}{15} + \frac{0}{15} + \frac{0,035}{3} = 0,81$$

Nota-se, portanto, que considerando tanto a composição química como o cálculo do carbono equivalente, o aço SAE 1020 é o que tem maior soldabilidade quando comparado ao aço 4130. Também é importante considerar que o aço 4130, dado o fato de ter $CE = 0,81$ (que é um valor elevado), precisaria de um pré-aquecimento antes da soldagem, o que encarece o processo.

Assim, o aço 1020 é mais vantajoso do que o 4130, além de ser mais barato.

Comparando o aço SAE 1020 com a liga de alumínio AA6061, não há dúvidas de que a segunda é muito mais leve do que a primeira. Assim, se o quesito para escolha for minimizar peso, escolhe-se a liga de alumínio; caso contrário, novamente o aço 1020 leva vantagem tanto em custo quanto em soldabilidade. Além disso, as ligas de alumínio necessitam de um tratamento térmico prévio de envelhecimento que está relacionado à precipitação do composto intermetálico Mg_2Si .

Para finalizarmos a resolução da problematização proposta, vamos nos concentrar em responder às seguintes questões que foram levantadas:

- a) Você teria condições de indicar uma quarta liga para o quadro da bicicleta?

Sim, pois as três ligas aqui apresentadas não encerram as opções de materiais para o quadro.

- b) Qual seria essa liga?

Veja que podemos indicar (ou especificar) outro aço para o quadro, como uma liga Fe-C comum e com teor de carbono tal que $0,20 < \%C \leq 0,40$, de excelente soldabilidade.

- c) Comparando com as três ligas aqui citadas, porque essa quarta liga também seria viável para o quadro da bicicleta?

Como falamos no parágrafo referente à questão (b), além de ser um aço de boa soldabilidade, tal liga apresenta boa resistência mecânica e é de custo menor do que a de um aço-ligado ou de uma liga não ferrosa.

Note que, para resolver o problema proposto, você mobilizou (direta e indiretamente) todos os conteúdos abordados nesta seção.

Como foi solicitado no final da proposta, você deverá entregar à sua chefia um relatório justificando a escolha do aço SAE 1020 em detrimento dos demais indicados.

Avançando na prática

Avaliação de soldagem de um acessório de alumínio em uma peça de aço carbono comum

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma empresa e seu chefe pediu-lhe que verificasse a possibilidade de se soldar um acessório de alumínio em uma peça fabricada, originalmente, em aço. Cabe a você pesquisar essa possibilidade e emitir um parecer favorável ou não a essa operação.

Resolução da situação-problema

Caro aluno, tem-se que aço e alumínio têm diferenças significativas nas suas temperaturas de fusão. O aço carbono comum, por exemplo, funde a uma temperatura em torno de 1400°C , ao passo que o alumínio funde a uma temperatura em torno de 660°C . Portanto, tal diferença torna-se um problema para unir dois metais de características tão distintas.

Uma possível solução para esse desafio seria revestir a superfície da peça de aço, na região de união, por meio de um processo chamado de aluminização. Tal processo equivale ao de niquelamento (ou niquelação), que envolve um banho por imersão da peça ou da região da peça, gerando uma camada superficial sobre a superfície de aço.

Uma vez revestida a superfície do aço com alumínio, na região a ser soldada, é possível fazer com que o acessório de alumínio seja

soldado à peça de aço, tomando o cuidado de não impactar as características metalúrgicas do aço.

Assim, você pode concluir que é possível soldar dois materiais de características tão distintas, desde que procedimentos de tratamento superficial sejam adotados; no caso discutido, a aluminização.

Faça valer a pena

1. Nos processos de soldagem a arco elétrico, alguns fatores devem ser considerados no estudo de transferência de calor em juntas soldadas. Dentre eles, destacamos o rendimento térmico desse arco, também conhecido como eficiência do arco elétrico (e_a), dada pela relação:

$$e_a = \frac{Q_l}{V.I}$$

em que e_a é a eficiência do arco (%), Q_l é a energia líquida disponível [W], V é a tensão do arco [volts] e I é a corrente de soldagem [A].

Logo, pode-se afirmar que:

- I. Q_l , a energia líquida disponível, é diretamente proporcional à eficiência (e_a) do arco.
- II. Em um caso extremo hipotético, no qual a eficiência do arco seja de 100%, a energia líquida disponível será igual à energia total $Q_T = V.I$.
- III. A unidade de energia líquida ou total, dada em Watts, é igual ao produto da tensão (V) pela corrente (I).
- IV. A eficiência real do arco elétrico é sempre um valor situado no intervalo $0 \leq e_a \leq 1,0$.
- V. Quanto mais eficiente for o arco elétrico, melhor será a qualidade da solda.

Após análise das afirmativas, assinale alternativa correta.

- a) Todas as afirmativas estão corretas.
- b) Apenas as afirmativas I, II e V estão corretas.
- c) Apenas as afirmativas I, II, III e IV estão corretas.
- d) Apenas as afirmativas I, II, III e V estão corretas.
- e) Apenas as afirmativas II, IV e V estão corretas.

2. As ligas ferrosas são basicamente os aços (com teores de carbono de até 2,0%) e os ferros fundidos (com teores de carbono acima de 2% e abaixo de 4,5%).

Considerando essas informações, analise as afirmações e a relação entre elas:

- I. A soldagem de ligas Fe-C (aços e ferros fundidos) é influenciada pelo teor de carbono da liga.

PORQUE

- II. Além de influenciar a dureza dos aços e ferros fundidos, o aumento do teor de carbono dificulta a soldagem das ligas Fe-C.

Agora, marque a alternativa que contém a avaliação correta das asserções apresentadas:

- a) A assertiva I é verdadeira, mas a assertiva II é falsa.
- b) As assertivas I e II são verdadeiras e a II complementa a I.
- c) A assertiva I é falsa, mas a assertiva II é verdadeira.
- d) As assertivas I e II são falsas.
- e) A assertiva I é verdadeira, mas a assertiva II não complementa a I.

3. Os aços-ligas são aços que se caracterizam por apresentarem elementos de liga que, além de influenciarem a formação dos elementos microestruturais do aço, contribuem para elevar sua resistência mecânica e dificultar sua soldagem. Seja o aço ligado SAE 2317 com a seguinte composição química: 0,15%C – 0,40%Mn – 0,03%P – 0,02%S – 0,03%Si – 3,15%Ni, considere a equação a seguir para cálculo do carbono equivalente como sendo:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3}$$

De acordo com os dados apresentados, é correto afirmar que:

- a) O valor do CE para o aço SAE 2317 é 0,33, portanto, ele não tem boa soldabilidade.
- b) O valor do CE para o aço SAE 2317 é 0,53, portanto, ele não é soldável.
- c) O valor do CE para o aço SAE 2317 é 0,67, portanto, exige um pré-aquecimento a temperaturas muito elevadas para ser soldado.
- d) O valor do CE para o aço SAE 2317 é 0,57, portanto, exige um pré-aquecimento a 400 °C.
- e) O valor do CE para o aço SAE 2317 é 0,43, portanto, ele tem boa soldabilidade.

Referências

ABB. **Rápida e flexível, segura e resistente**. Disponível em: <<http://www.abb.com.br/cawp/seitp202/d9026844aebfb1328325799e003d9284.aspx>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

CANALE, Lauralice. **Ligas de alumínio**. 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/305685/mod_resource/content/1/Aula_12_Ligas%20de%20Alum%C3%ADnio%20Lauralice.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2018.

GOMES, Márcio. **Processos de fabricação: soldagem**. Disponível em: <https://professormarciogomes.files.wordpress.com/2008/09/aulas-10-e-11-soldagem_12.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2018.

INFOMET. **Liga Al-Mg-Si**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=54>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

_____. **Tabela 1.1 – Composição química de aços carbono**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=243>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

_____. **Tabela 1.26 – Composição química, conforme norma italiana UNI de aços liga**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=269>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

INFOSOLDA. **Soldabilidade do aço carbono**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/metalurgia/134-soldabilidade-do-aco-carbono.html>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Solda e tratamentos superficiais**. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/solda-e-tratamentos-superficiais/>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

TANIGUCHI, Célio. Transferência de calor na soldagem. In: WEINER, Emílio et al. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Blucher, 2015. cap. 8, p. 359-370.

WAINER, Emílio et al. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Blucher, 2015.

Metalurgia da soldagem

Convite ao estudo

Bem-vindo, caro aluno, à Unidade 2 de ensino que tratará da metalurgia da soldagem. Uma vez que a soldagem é um processo de fabricação que envolve calor e fusão/solidificação do material manufaturado, dada a sua similaridade com a fundição de materiais, os aspectos metalúrgicos são de grande importância e devem ser estudados com muita dedicação! A metalurgia da soldagem revela a condição macro e microestrutural da solda, apresentando uma importância singular para a prevenção de sinistros envolvendo materiais soldados.

Nessa unidade, você irá conhecer e compreender os aspectos e características metalúrgicas que envolvem os processos de soldagem. E como resultado final de aprendizagem, você saberá dimensionar o fluxo de calor e definir sua influência no processo de soldagem, conhecerá as características da zona fundida e ZTA, distinguirá os defeitos de descontinuidades comuns em solda, assim como os equipamentos e acessórios utilizados na soldagem convencional.

A fim de contextualizar os conteúdos que serão estudados, temos como cenário um setor de soldagem da metalúrgica em que você trabalha (um setor ativo e produtivo), que vem enfrentando nos últimos tempos uma série de problemas nos cordões de solda e nas ZTAs de chapas soldadas, que demandam soluções rápidas para atender as necessidades dos clientes. Esses clientes são diversificados, como empresas de grande porte que fabricam equipamentos pesados para o setor agrícola (tratores e roçadeiras), assim como empresas

que usam grandes reservatórios de aço inoxidável para armazenar produtos especiais líquidos (produtos ácidos, por exemplo). Nesse contexto, você terá que solucionar problemas relacionados às falhas na solda de peças usadas em máquinas agrícolas, deverá estipular quais consumíveis serão utilizados e quais as máquinas e métodos de soldagem mais adequados para manufaturar a estrutura de uma caçamba de caminhão.

Você terá, ainda, os seguintes desafios para chegar a uma solução para soldagem: (i) qual chapa deverá ser usada? (ii) qual máquina de solda será utilizada? (iii) qual o tipo de consumível que você irá especificar? (iv) qual será o melhor método de soldagem a ser aplicado? Para tanto, será exigido ao máximo seu raciocínio crítico para resolução de problemas.

Você fará uso de todo o conhecimento adquirido nesta unidade de ensino para a solução dos desafios propostos e deverá estar apto a responder sobre tipos de falhas na solda (cordão) e na sua ZTA. Para dar conta de tudo isso, você estudará o metal base e o metal de solda – o cordão de solda e sua estrutura metalúrgica; ciclos térmicos de soldagem e fluxo de calor; as características da zona fundida e ZTA (Zona Termicamente Afetada) e defeitos na ZTA: fissuração por hidrogênio, de coesão lamelar e trincas de aquecimento. Você ainda poderá verificar a influência do carbono na soldabilidade das ligas Fe-C; a microestrutura da solda; as tensões residuais presentes no cordão de solda; assim como as máquinas de soldagem e seus acessórios principais (por exemplo, as fontes de soldagem). Irá conhecer os tipos e funções dos consumíveis adentrando, ao longo de toda a unidade, no mundo da metalurgia da soldagem!

Bons estudos!

Seção 2.1

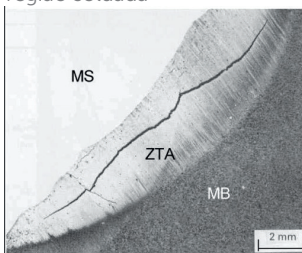
Fundamentos da metalurgia da soldagem

Diálogo aberto

Caro aluno, estamos iniciando a segunda unidade de ensino e você irá se deparar com os fundamentos da metalurgia da soldagem, que aborda, entre outras coisas o metal de solda, as características da zona termicamente afetada (ZTA), tipos de defeitos que estão sujeitos a ocorrer e como evitá-los. A soldagem é um processo de fabricação muito comum na indústria metalúrgica e mecânica, daí a importância de se conhecer esses conteúdos tanto na sua vida acadêmica como na sua futura vida profissional.

Temos que a metalúrgica na qual você trabalha tem um setor de soldagem que realiza a solda em chapas que são, posteriormente, incorporadas em máquinas agrícolas (colheitadeiras). No entanto, nos últimos lotes de produção tem se constatado uma série de reclamações dos clientes que dizem ocorrer falhas na peça que usa a chapa soldada. Essa peça, na verdade, compõe a tampa protetora lateral do sistema rotativo de corte da colheitadeira. Se essa peça falhar (quebrar), o sistema rotativo de corte fica sem proteção e o produto cortado pode se dispersar lateralmente à colheitadeira. O setor de controle de qualidade tem realizado alguns testes nas soldas, mas ainda não chegou a uma conclusão sobre que tipo de trinca se trata e qual a causa da sua ocorrência. O responsável pelo setor controle de qualidade lhe apresentou uma micrografia da região de solda, conforme ilustra a Figura 2.1 a seguir:

Figura 2.1 | Micrografia da região soldada



Fonte: adaptada de Paredes [s/d]. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Defeitos%20em%20soldagem.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

Foram aventadas as seguintes possibilidades: trata-se de uma trinca por hidrogênio na ZTA ou uma trinca de reaquecimento. Você deverá avaliar qual das duas possibilidades está ocorrendo na situação proposta, fazendo uso do seu raciocínio crítico para resolução de problemas. Após a avaliação, um parecer técnico, por meio de um relatório consubstanciado, deverá ser entregue à sua gerência.

Quais são os fatores de soldagem que levam a ocorrência de falhas (trincas) na ZTA? O que é possível e recomendado para evitar esse tipo de falha? Por que uma macroestrutura é suficiente para visualizarmos um defeito de solda na ZTA?

Veja que todas essas questões podem ser respondidas com base nos conteúdos mobilizados nesta seção, ou seja, metal base e metal de solda – o cordão de solda e sua estrutura metalúrgica, aporte térmico para soldagem, características da zona fundida, ZTA e os defeitos que nela ocorrem.

Você está pronto para esse novo desafio? Bom trabalho!

Não pode faltar

Metal base e Metal de solda – O Cordão de Solda e Sua Estrutura Metalúrgica

A soldagem envolve a união de duas partes metálicas. A parte metálica da peça principal é o chamado “metal base”, ou seja, é o material principal da peça manufaturada. Para unir essas duas partes, é necessário preencher a região de união, chamada de chanfro ou perfil, com um outro metal (advindo do eletrodo consumível) que consiste no “metal de solda”, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 | Desenho esquemático do metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS)



Fonte: adaptada de Piveta et al (2013). Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1807-25772013000100001>. Acesso em: 18 mai. 2018.

Portanto, o cordão de solda é formado basicamente pelo metal base e pelo metal de preenchimento (quando se usa eletrodo consumível) e a região afetada pela soldagem possui características metalúrgicas peculiares, das quais iremos estudar ao longo desta seção.

Em uma análise geral, o ideal seria que as três regiões da solda (cordão de solda, ZTA e metal base) apresentassem as mesmas propriedades mecânicas e metalúrgicas, fato que não acontece na prática. O que se observa de fato é que o cordão de solda é o metal fundido que se solidificou após a fusão, o metal base sofreu fusão parcial (ou seja, fundiu-se na zona do cordão de solda, misturando-se um pouco com o metal de solda) e a ZTA sofreu um forte impacto do calor envolvido no processo em questão, portanto, está sujeita à alterações metalúrgicas significativas.

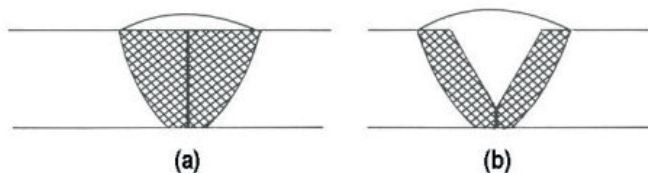
O metal de solda é, no entanto, uma miniatura de um fundido que é rapidamente resfriado, e suas propriedades frequentemente se assemelham as de um material conformado (Fortes, C. 2005, p. 38).

Existe uma situação na qual não se utiliza eletrodo (que seria o responsável pelo metal de solda), mas sim uma pistola de gás inflamado, que tem a função de fundir o metal base, unindo as duas partes a serem soldadas. Nesse caso, metal base e metal de solda consistem no mesmo material, embora com propriedades distintas.

Seja o processo de soldagem executado com eletrodo ou não, falamos que o metal depositado é o “diluído” no metal base. Essa diluição pode ser calculada em porcentagem da seguinte maneira, de acordo com a Figura 2.3:

$$(\% \text{diluição}) = \frac{\text{área}_{\text{hachurada}}}{\text{área}_{\text{cordão solda}}} \times 100$$

Figura 2.3 | Estimativa da diluição a partir da geometria da solda: (a) junta de topo-a-topo; (b) junta com chanfro em V



Fonte: Fortes (2005, p. 38). Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

O Quadro 2.1 a seguir nos mostra que a estrutura metalúrgica do cordão de solda varia de acordo com o tipo material que está sendo trabalhado.

Quadro 2.1 | Característica metalúrgica de cordão de solda para diversos materiais

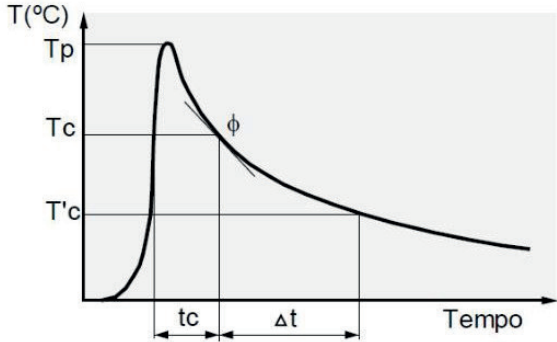
Material	Microestrutura	Propriedades ou Características
Aço carbono comum e Aço Manganês	Grãos colunares circundados por ferrita e plaquetas de ferrita a partir dos contornos de grãos.	Apresenta baixa tenacidade e pode se aplicar tratamento térmico de normalização.
Aços temperáveis	Formação de martensita ao redor do cordão de solda.	Dureza elevada.
Aços inoxidáveis austeníticos	Martensita (sem alteração de fase no estado sólido).	Liquefação de filmes de constituintes de baixo ponto de fusão nos contornos de grão, formando trincas de solidificação.

Fonte: adaptado de Fortes (2005, p. 41-42). Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

Aporte Térmico para Soldagem – Ciclos Térmicos de Soldagem e Fluxo de Calor

Toda soldagem obedece a um ciclo térmico que, embora possa sofrer algumas pequenas variações, em geral apresenta a curva característica como a mostrada na Figura 2.4 a seguir.

Figura 2.4 | Ciclo térmico característico de soldagem



Fonte: adaptada de Fortes (2005, p. 39).

De acordo com o gráfico da Figura 2.4, temos os seguintes pontos a destacar:

T_p = temperatura de pico, ou seja, a temperatura máxima atingida na solda, dada em [°C];

T_c = temperatura crítica, ou seja, a temperatura mínima para ocorrer uma mudança relevante no material (tal como uma mudança de fase, por exemplo), dada em [°C];

t_c = tempo de permanência acima da temperatura crítica (T_c), que se trata do tempo em que a região de soldagem fica submetido à temperaturas superiores a uma temperatura crítica, dado em [s];

Δt = intervalo de tempo do processo de resfriamento da solda, dado em [s].

O intervalo de tempo do processo de resfriamento da solda serve para calcular a velocidade de resfriamento (v_r) da solda, dada pela relação:

$$v_r = \frac{T_c - T'_c}{\Delta t}$$

Em que v_r também é igual a inclinação ϕ indicada no gráfico da Figura 2.4.

As elevadas temperaturas e suas variações observadas em soldagem promovem, além da fusão do metal (e sua solidificação quando as temperaturas diminuem), uma série de variações dimensionais e de microestrutura do material. Esses fenômenos são causados pela energia de soldagem envolvida nos processos, também conhecida com aporte térmico (H) que é definido como sendo a relação de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento de junta, ou seja:

$$H = \frac{q}{L} = \frac{t}{L} = \frac{P}{v}$$

Em que q é o calor gerado pela fonte; L é o comprimento da junta; t é o tempo de soldagem; P é potência (energia/tempo) gerada e v é a velocidade de soldagem.

A Energia de Soldagem ou Aporte Térmico (H) é dado, geralmente em kJ/mm ou kJ/cm .

Na soldagem a arco, temos que H é dado por:

$$H = \frac{P}{v} = \frac{VI}{v}$$

Em que V é a tensão do arco e I a corrente de soldagem.

A energia líquida de soldagem (H_L) é dada por:

$$H_L = \eta \cdot H$$

Em que η é o rendimento térmico do processo de soldagem (lembrando que $\eta < 1,0$).

A Tabela 2.2 a seguir mostra o rendimento térmico médio de alguns processos de soldagem.

Tabela 2.2 | Rendimento térmico médio de alguns processos de soldagem

Processo de Soldagem	Rendimento Térmico Médio (η)
Arco submerso (SAW)	0,85 – 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 – 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 – 0,90
TIG (GTAW)	0,20 – 0,80
Laser (LBW)	0,005 – 0,70

Fonte: adaptado de Modenesi (2003, p. 2).



Exemplificando

Considere uma soldagem de uma junta metálica realizada pelo processo TIG (GTAW) cujo rendimento térmico estimado seja de 45% para uma temperatura crítica de 850°C e considerando que o tempo

de resfriamento da solda entre a temperatura crítica e a temperatura de 300°C seja de 5 minutos, calcule a velocidade de resfriamento da solda. Sabendo também que a tensão de soldagem é de 50 V para uma corrente de 700 A, qual o aporte térmico e a energia líquida desse processo sendo a velocidade de soldagem estimada em 300 mm/min?

Solução:

Calculando a velocidade de resfriamento nos intervalos de tempo e temperatura considerados, temos:

$$v_r = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{850 - 300}{5} = 110^{\circ}\text{C} / \text{min}$$

O aporte térmico (H) é dado por:

$$H = \frac{VI}{v} = \frac{50.700}{300}.60 = 7002\text{J} / \text{mm} = 7\text{kJ} / \text{mm}$$

Como a velocidade de soldagem está em mm / min é necessária a multiplicação por 60 para trabalharmos com a mm / s .

A energia líquida é $H_L = \eta.H = 0,45 \times 7 = 3,15\text{kJ} / \text{mm}$.

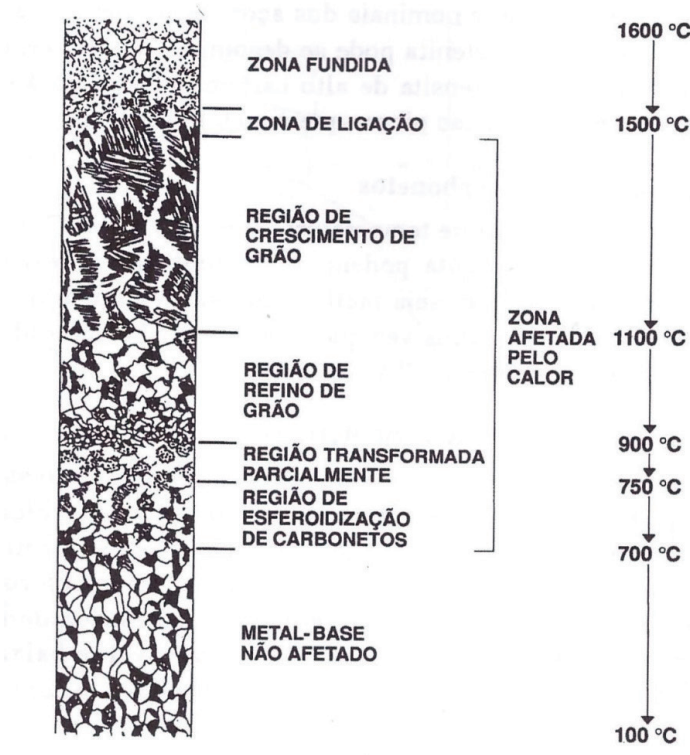
Finalizamos o exemplo, calculamos a velocidade de resfriamento da solda ($110^{\circ}\text{C} / \text{min} = 1,83^{\circ}\text{C} / \text{s}$) e concluímos que na soldagem da peça é consumida uma energia de $7,0\text{kJ} / \text{mm}$.

Características da zona fundida e ZTA

A zona fundida, que é a região que sofreu fusão e formou cordão de solda, e a ZTA possuem características distintas. A zona fundida sofre um processo muito similar ao processo que ocorre na fundição, pois nesta região o metal base sofre fusão (muda de estado sólido para líquido) e solidifica de forma rápida, formando o cordão de solda. Dessa forma, ao se formar, o cordão de solda adquire propriedades que dependem da velocidade de resfriamento ao solidificar-se, depende do tipo de proteção que foi utilizado durante a soldagem (gás ou escória) que evita a contaminação da solda, além do tipo de eletrodo utilizado e da compatibilidade entre

o metal de preenchimento e o metal base. A Figura 2.5 a seguir é ilustrativa desses fatos, pois mostra como varia a granulação da microestrutura a partir da zona de solda e, obviamente, essa variação da granulometria afeta as propriedades das regiões em questão.

Figura 2.5 | Alterações microestruturais em uma soldagem, com mudanças significativas dos tamanhos de grãos



Fonte: adaptada de WAINER et al. (2015, p. 420).

A ZTA, por sua vez, é a região próxima ao cordão de solda que não sofreu fusão, porém o calor induzido pela soldagem pode afetar significativamente a sua microestrutura, podendo ocorrer transformação de fase no estado sólido nessa zona. A amplitude dessas mudanças de propriedades varia de acordo com o metal base, o metal de enchimento de solda, e a quantidade e concentração de entrada de calor pelo processo de soldagem.



Siga esse raciocínio: os metais apresentam uma propriedade que é a sua elevada difusividade térmica, ou seja, são bons condutores de calor. Logo, faz sentido dizer que se o material soldado é resfriado rapidamente sua difusividade é elevada e a ZTA é relativamente pequena e vice-versa, ou seja, o tamanho da ZTA é inversamente proporcional a difusividade do material. Você concorda? Pense um pouco!

O processo de solidificação do metal fundido ocorre por nucleação e crescimento, que determina o tamanho e a orientação dos grãos formados e, por consequência, influencia as propriedades mecânicas e a qualidade da solda (Kiminami et al, 2013. p. 143).

Defeitos na ZTA: fissuração por hidrogênio, decoesão lamelar, trincas de aquecimento

A ZTA (Zona Termicamente Afetada) é uma região potencial para a ocorrência de defeitos e seu comportamento em um material qualquer, seja ferroso ou não, é um aspecto importante como critério de soldabilidade. Os principais defeitos que podem ocorrer na ZTA são:

- i. fissuração por hidrogênio (designada também por fissuração sob cordão);
- ii. decoesão lamelar;
- iii. trincas de reaquecimento;
- iv. fissuração por corrosão sob tensão;
- v. trincas de liquação ou microfissuração.

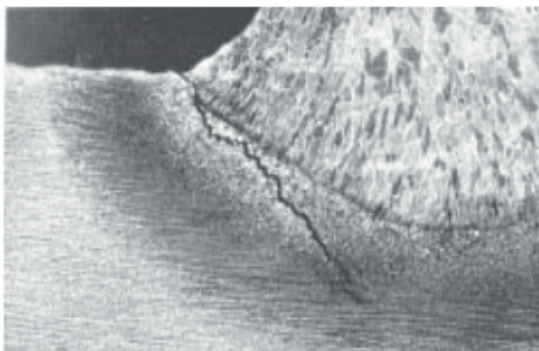


Veja que neste tópico estamos falando de defeitos que ocorrem na ZTA que são defeitos distintos daqueles possíveis de ocorrer na solda ou cordão de solda. Portanto, há de se assimilar as diferenças entre os defeitos na ZTA e os defeitos no cordão de solda!

Fissuração por hidrogênio: também conhecida por “trinca a frio”, esse defeito na ZTA ocorre devido a descontinuidades que se desenvolvem algum tempo depois da soldagem. Além disso podemos também associar esta trinca à taxa de resfriamento, ou seja, quanto maior a taxa de resfriamento mais facilmente a estrutura pode trincar. Outras nomenclaturas para esse tipo de defeito na ZTA são as seguintes: *cold cracking* (fissuração a frio), *delayed cracking* (fissuração retardada), *underbead cracking* (fissuração sob o cordão) e *toe cracking* (fissuração na margem do cordão).

Além de ocorrer na ZTA, esse tipo de defeito pode ocorrer também na zona fundida em aços de maior resistência mecânica. A forma típica da fissuração por hidrogênio é representada na Figura 2.6 a seguir.

Figura 2.6 | Fissuração por hidrogênio na ZTA mostrada na micrografia



Fonte: Silva e Paranhos (2003, p. 01).

A fissuração por hidrogênio é consequência da ação simultânea de quatro fatores: (1) a presença de hidrogênio dissolvido no metal fundido; (2) as tensões residuais associadas a soldagem; (3) a uma microestrutura frágil (normalmente a martensita) e; (4) a baixa temperatura (abaixo de **150°C**). (Silva e Paranhos, 2003, p. 1).

As principais medidas a se tomar para evitar sua ocorrência são as seguintes:

- i) Fazer o controle atmosférico de hidrogênio usando um eletrodo o mais seco possível;

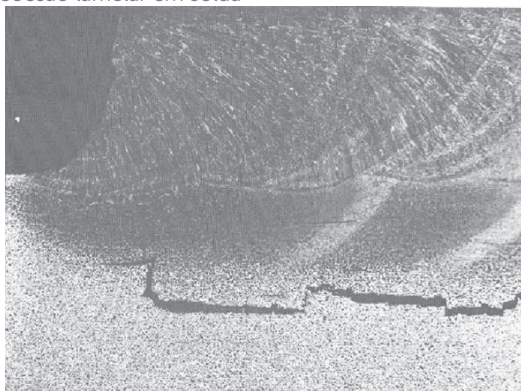
- ii) Realizar um pré-aquecimento no material a ser soldado, diminuindo a possibilidade de ocorrência de microestrutura frágil;
- iii) Realizar controle de tensões (deformações) que induzem a formação de discordâncias que transportam hidrogênio pela microestrutura do aço;

Realizar um aquecimento em torno de **250°C** após a soldagem e manter a solda em temperatura que facilita a difusão do hidrogênio (evita sua concentração que causa fissuração)

A temperabilidade da região fundida é, em geral, menor que a da ZTA, como consequência, há uma maior facilidade do hidrogênio migrar para a segunda.

Decoesão lamelar: é um tipo de defeito comum em chapas grossas laminadas; que resulta de imperfeições no metal base acrescidas pelas deformações provocadas pela soldagem e forma de junta inadequada. Sua aparência é equivalente às lamelas, que são camadas sobrepostas formando degraus; daí a denominação lamelar. Decoesão vem do fato das partes não estarem ligadas uniformemente entre si, ou seja, sem coesão. O problema ocorre no metal base e na ZTA em planos que são paralelos à superfície da chapa. A decoesão lamelar pode ser considerada um tipo de trinca interna que não aparece superficialmente (daí a dificuldade de detectá-la por inspeção visual). A Figura 2.7 ilustra esse tipo de defeito.

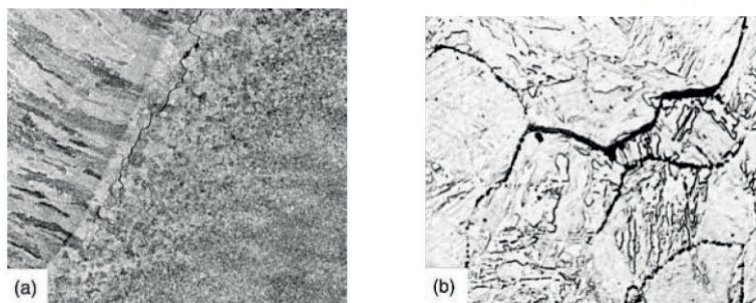
Figura 2.7 | Decoesão lamelar em solda



Fonte: <<http://principio.org/definico-de-soldagem.html?page=3>>. Acesso em: 18 maio 2018.

Trincas de aquecimento: também conhecidas por “trincas de reaquecimento”, podem ocorrer em alguns aços de baixa liga nos contornos de grão, na região de granulação grosseira da ZTA, após a solda ter entrado em serviço a altas temperaturas (trincas de aquecimento) ou ter sido tratada termicamente (trincas de reaquecimento). Existem algumas causas que podem ser citadas como prováveis, como o endurecimento no interior dos grãos, que gera (ou desloca) deformação apenas nos contornos do grão que quando apresentam/somam impurezas, podem gerar a falha. A Figura 2.8 ilustra uma trinca desse tipo.

Figura 2.8 | Trinca por aquecimento em aço CrMoV



Fonte: Paredes ([s/d], p.27). Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Defeitos%20em%20soldagem.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2018.



Pesquise mais

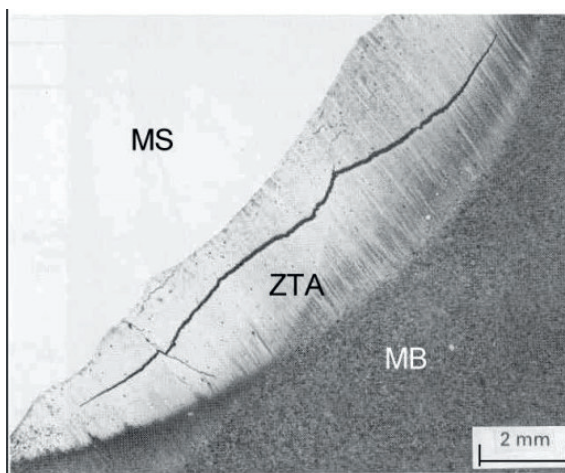
Temos diversos defeitos na ZTA, causados por variados fatores. Além dos que já citamos há, ainda, a fissuração por corrosão sob tensão e as trincas de liquação ou microfissuração. Pesquise um pouco sobre eles na página 48 da *Apostila de Metalurgia da Soldagem (ESAB)*, disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2018. Boa pesquisa!

Sem medo de errar

Caro aluno, chegou a hora de resolver o problema proposto nesta seção. Lembre-se que uma metalúrgica tem um setor de soldagem que solda chapas que são, posteriormente, incorporadas

em máquinas agrícolas (colheitadeiras). Nos últimos lotes de produção, tem se constatado uma série de falhas na peça que usa a chapa soldada, conforme ilustra a Figura 2.1 reproduzida novamente a seguir:

Figura 2.1 | Micrografia da região soldada



Fonte: adaptada de Paredes [s.d.]. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Defeitos%20em%20soldagem.pdf>> Acesso em: 16 fev. 2018.

Das possibilidades levantadas, você deverá avaliar: se trata de uma trinca por hidrogênio na ZTA ou uma trinca de reaquecimento?

A partir da micrografia apresentada na Figura 2.1, nota-se que o defeito é um tipo de trinca longitudinal situada, praticamente, na região central da ZTA. Observe que o metal de solda (MS) e o metal base (MB) estão intactos, livres desse defeito.

Pela escala indicada na parte inferior direita da imagem, a trinca tem aproximadamente 16 mm de extensão e olhando a trinca de baixo para cima na imagem, a cerca de 6 mm ela cruza com outra provável trinca transversal à ZTA.

Fazendo uma análise comparativa com a imagem da Figura 2.4 (que ilustra uma trinca por hidrogênio) notamos uma certa similaridade entre elas. Deve-se lembrar ainda que esse tipo de defeito é também conhecido por “trinca a frio”, e ocorre justamente na ZTA devido a descontinuidades que se desenvolvem algum

tempo depois da soldagem (muito provavelmente devido a um resfriamento descontrolado). Aliás, por ser uma trinca a frio, ela não poderia se caracterizar como uma trinca por reaquecimento como foi aventado entre as possibilidades.

Ainda há de se considerar que a fissuração por hidrogênio é consequência da ação simultânea de quatro fatores: (1) a presença de hidrogênio dissolvido no metal fundido; (2) as tensões residuais associadas ao processo de soldagem; (3) a uma microestrutura frágil (normalmente a martensita) e; (4) a baixa temperatura (abaixo de **150°C**). Esses são, portanto, os fatores que devem ter contribuído para a ocorrência dessas falhas (trincas) na ZTA.

Há uma importante questão para responder. Se, de fato, trata de uma fissuração por hidrogênio, então o que deve ser recomendado para se evitar esse tipo de falha?

Algumas medidas são possíveis de se tomar para evitar esse problema. Entre elas, podemos destacar o controle de hidrogênio na atmosfera utilizando eletrodos o mais seco possível, promover um pré-aquecimento do material a ser soldado (evitando a fragilização do metal), tentar evitar a ocorrência de tensões residuais (geram discordâncias que transportam hidrogênio), além de um aquecimento pós-soldagem, que é recomendável pois auxilia na difusão do hidrogênio diminuindo a susceptibilidade às trincas.

Outra questão: por que uma macroestrutura é suficiente para visualizarmos um defeito de solda na ZTA? Note que a extensão da falha (trinca) é de, aproximadamente, 16 mm (de acordo com a escala indicada), o que é facilmente detectado à olho nu, embora a imagem da ilustração seja uma micrografia (obtida por ataque químico e análise por microscopia ótica).

Veja que todas essas questões podem ser respondidas com base nos conteúdos mobilizados nesta seção. Note, em particular, a importância do ciclo térmico de soldagem, pois uma vez bem controlado e determinado como será esse ciclo, a influência do hidrogênio pode ser minimizada.

Observe que foi possível aplicar os resultados de aprendizagem previstos, ou seja, saber determinar a influência do calor (ciclo

térmico) e definir sua influência no processo de soldagem, conhecer as características da zona fundida e da ZTA, distinguir os defeitos de descontinuidades comuns em solda.

Finalizando sua tarefa, você deve redigir seu parecer técnico, e encaminhá-lo por meio de um relatório consubstanciado, a ser entregue à sua gerência.

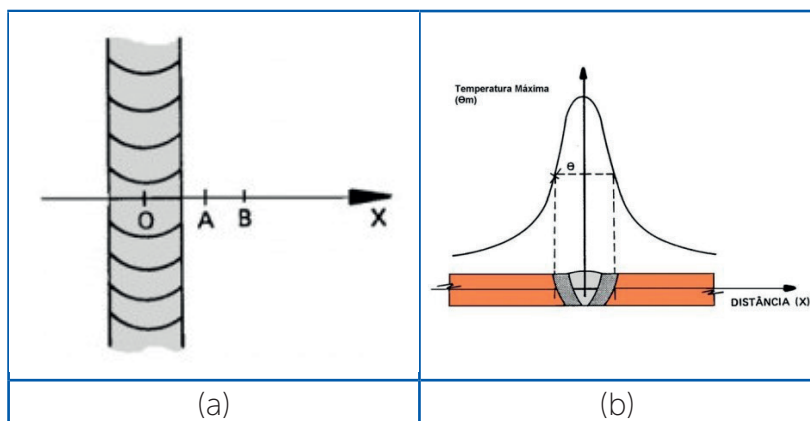
Avançando na prática

Solução gráfica qualitativa do ciclo térmico de soldagem

Descrição da situação-problema

No laboratório de análise de materiais, no qual você está fazendo um estágio supervisionado, você foi incumbido de esboçar um gráfico do ciclo de soldagem para três regiões distintas de uma peça soldada, que são mostradas na Figura 2.9 (a). A única informação que lhe enviaram é que o perfil geral de temperatura é tal como o da Figura 2.9 (b).

Figura 2.9 | Perfil da temperatura em solda (a) do cordão para o metal base; (b) perfil da temperatura da zona de solda

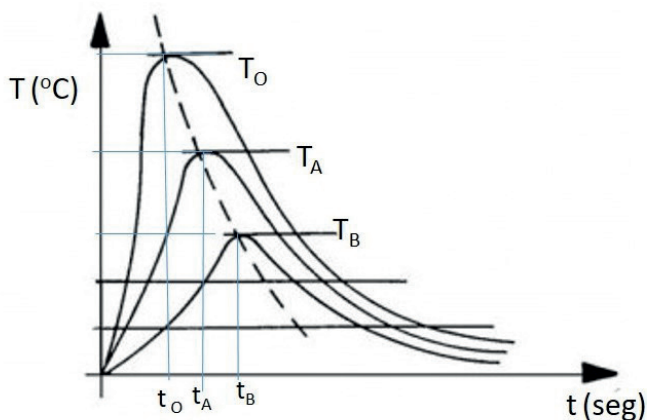


Fonte: adaptadas de FTBS (p.4-5). Disponível em: <http://www.ftbs.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/D7_T2_aspectos_termicos.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2018.

Resolução da situação-problema

A solução gráfica desta distribuição de temperatura de soldagem nos pontos O, A e B pode ser visualizada na Figura 2.10 a seguir. Os pontos indicados foram monitorados por cronometragem e por termopares instalados nos pontos de análise e com os registros dos tempos e das temperaturas.

Figura 2.10 | Distribuição qualitativa da temperatura de soldagem nos pontos O, A e B da peça soldada



Fonte: adaptada de FTBS (p. 5).

Conclui-se que, à medida que se afasta do cordão de solda, no sentido do metal base não afetado pelo calor, as temperaturas máximas vão diminuindo, porém, a taxa de resfriamento (velocidade) apresenta curvas "quase" paralelas.

Faça valer a pena

1. Sabemos que na soldagem o cordão de solda é formado basicamente pelo metal de base e pelo metal de preenchimento (quando se faz uso de eletrodos consumíveis) e possui suas características metalúrgicas peculiares. No entanto, pode acontecer da soldagem ocorrer sem o uso de eletrodo consumível.

De acordo com o texto-base e seus conhecimentos sobre soldagem, assinale a seguir a alternativa correta:

- a) Quando não se usa eletrodo consumível, o cordão de solda é homogêneo.
- b) Da união do metal base com o metal de preenchimento temos o cordão de solda, que possui propriedades intermediárias entre os dois metais, sendo o mais próximo possível do metal base.
- c) Não é possível realizar soldagem sem metal de preenchimento advindo de eletrodo consumível.
- d) O cordão de solda, independente da forma obtida, apresentará as mesmas propriedades do metal base.
- e) O cordão de solda é formado pelo metal base.

2. Na soldagem as características de microestrutura da região soldada são afetadas por diversas variáveis metalúrgicas. Sendo assim, considere as seguintes afirmativas:

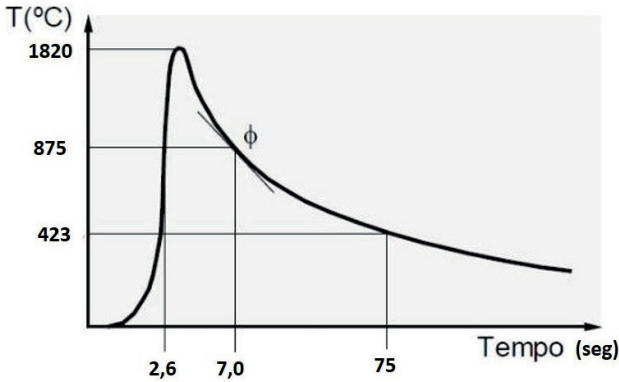
- () Cordão de solda e ZTA de durezas elevadas se devem, entre outros fatores, pela ocorrência de resfriamento rápido em aços de alta temperabilidade.
- () Grãos colunares circundados por ferrita e plaquetas de ferrita a partir dos contornos de grãos é característica de solda em aços inoxidáveis ferríticos.
- () A martensita que surge em cordões de solda de aços inoxidáveis e de alta temperabilidade exige tratamento térmico posterior de revenimento.
- () Cordões de solda de aços carbono comuns apresentam baixa tenacidade e pode se aplicar tratamento térmico de normalização.

Com base na sequência de valores lógicos V e F das afirmativas anteriores, marque a alternativa que contém a ordem correta:

- a) F - F - V - V.
- b) V - V - V - V.
- c) V - F - V - F.
- d) V - F - V - V.
- e) V - V - F - V.

3. A soldagem é um processo de fabricação que envolve variação de temperatura e, por conseguinte, há o desenvolvimento de um ciclo térmico tal qual o ilustrado na Figura 2.11, para uma soldagem de uma junta de aço qualquer.

Figura 2.11 | Ciclo de soldagem de uma junta de aço



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

No intervalo entre as temperaturas críticas e a de ϕ , qual é a taxa de resfriamento?

- a) $6,24^{\circ}\text{C}/\text{s}$ e trata-se de uma velocidade de resfriamento rápida.
- b) $24,26^{\circ}\text{C}/\text{s}$ e trata-se de uma velocidade de resfriamento muito rápida.
- c) $317,5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ e trata-se de uma velocidade de resfriamento extremamente rápida.
- d) $6,64^{\circ}\text{C}/\text{s}$ e trata-se de uma velocidade de resfriamento não muito rápida.
- e) Não é possível calcular a velocidade de resfriamento no intervalo considerado.

Seção 2.2

Defeitos na solda; tensões residuais; macroestrutura

Diálogo aberto

Prezado aluno, nesta segunda seção intitulada “Defeitos na solda; tensões residuais; macroestrutura” serão abordados os seguintes defeitos do metal de solda: trincas de solidificação, porosidade, trincas induzidas, inclusões, crateras; além de apresentar os conceitos de tensões residuais na soldagem e formas de alívio de tensões; a influência do carbono na soldabilidade de metais e; o diagrama Fe-C, a fim de analisar a macroestrutura de soldas por fusão. Assim, destaca-se a importância do autoestudo! Tenha em mente que diversas empresas usam tanques de aço inoxidável para fins de armazenamento de diversos tipos de líquidos, desde vinhos (envelhecidos em tanques de inox) até produtos químicos. Tais reservatórios exigem manutenção periódica e podem apresentar defeitos que exigem reparos de soldagem.

Sendo assim, caro aluno, temos que o setor de soldagem da metalúrgica em que você trabalha vem detectando problemas nos cordões de solda das chapas de aços inoxidáveis soldadas. Uma dessas falhas vem ocorrendo na solda de peças de aço inoxidável ferrítico de grandes reservatórios para armazenar produtos especiais líquidos.

Um tanque de aço inoxidável ferrítico do tipo ABNT430, cuja composição é de 0,03% C, 0,9% Mn, 0,7% Si e 17,3% Cr vem apresentando problemas de soldagem, como dificuldades em soldar o material, solda pouco eficiente, dentre outros; e a empresa busca um aço equivalente em teor de carbono para substituí-lo. Cabe a você determinar, com seu raciocínio crítico e capacidade de resolução de problemas, qual o aço de carbono equivalente é recomendado e, com base no diagrama Fe-C, quais as microestruturas esperadas na zona de solda durante o resfriamento. Lembrando a expressão para cálculo de carbono equivalente:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3}$$

Você seria capaz de indicar uma outra expressão para calcular o carbono equivalente? Haveria diferenças nos resultados? Por quê? Note que você está trabalhando com um aço inoxidável ferrítico, mas qual seria a diferença fundamental se trabalhasse com um aço carbono comum de baixo carbono? O diagrama Fe-C seria mais útil? Verifique se é possível avaliar a influência da velocidade de resfriamento na soldagem desse aço inox ferrítico. Há a possibilidade de se formar martensita? Se sim, isso deve ser evitado ou minimizado? Como?

Ao final da solução deste desafio, caberá a você entregar ao seu chefe um relatório com as suas conclusões, indicando os cálculos realizados e suas análises críticas.

Observe que os conteúdos mobilizados nessa seção, além de permitirem que você solucione a problematização proposta, contribuirão de forma significativa para sua formação acadêmica e profissional visto que tais conhecimentos são indispensáveis para uma boa atuação da área de soldagem. Tais conteúdos mobilizados envolvem defeitos do metal de solda (trincas de solidificação, porosidade, trincas induzidas, inclusões, crateras), tensões residuais na soldagem e formas de alívio de tensões, influência do carbono na soldabilidade de metais, diagrama Fe-C e macroestrutura de soldas por fusão.

Mãos à obra!

Não pode faltar

Defeitos do metal de solda: trincas de solidificação, porosidade, trincas induzidas, inclusões, crateras

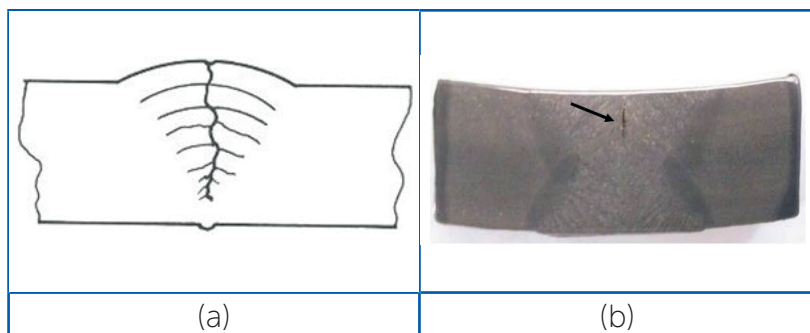
O produto da soldagem, também chamado de cordão de solda, está sujeito a apresentar uma série de defeitos que o inviabiliza, tornando necessárias algumas precauções para evitá-los (tal como controle de atmosfera ou de resfriamento, por exemplo). Dentre os vários tipos de defeitos possíveis de ocorrer, vamos destacar aqui os seguintes:

a) Trinca de solidificação: a soldagem, em geral, é realizada entre um metal base e um metal de solda de composição química similar, por questões de afinidade química. No entanto, aços altamente

ligados e a maioria das ligas não ferrosas são soldadas com eletrodos ou com metal de adição de diferente composição química do metal base, por possuírem temperatura de solidificação maiores que das demais ligas. Esse fator torna esses aços (altamente ligados) e as ligas não ferrosas sujeitas a sofrerem fissuração de solidificação (ou a quente). O mecanismo de formação de trincas de solidificação tem influência direta da ação de tensões que são geradas durante o resfriamento, o que pode provocar a separação em duas superfícies (a trinca é observada na região interdendrítica) e este tipo de trinca é intergranular.

Para evitar a ocorrência desse tipo de defeito, é recomendada a escolha de consumíveis especiais que reduzem a faixa de temperatura de solidificação a partir da adição de elementos. A Figura 2.12 a seguir mostra esse tipo de defeito em soldas.

Figura 2.12 | Trinca de solidificação em solda



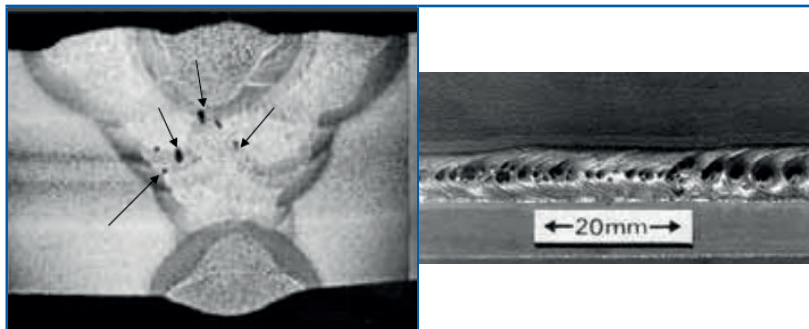
Fonte: adaptada de Paredes [s/d].

b) Porosidade: é um tipo de defeito interno à solda. É considerado de baixa periculosidade para a solda, a não ser que tais porosidades avancem para a superfície da solda, formando entalhes que conduzem a falha por fadiga. Há três tipos de porosidades:

- Resultantes da reação química na poça de fusão;
- Resultantes da expulsão de gás de solução, enquanto a solda resfria (solidifica) e;
- Pelo aprisionamento de gases na base de poças de fusão turbulentas na soldagem com gás de proteção.

A Figura 2.13 a seguir ilustra a ocorrência de porosidade em soldas.

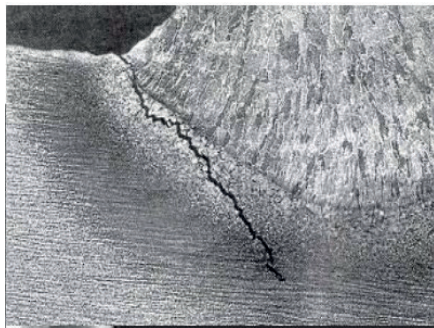
Figura 2.13 | Porosidade em soldas



Fonte: adaptado de Paredes [s.d.].

c) Trincas induzidas por hidrogênio: é mais comum de ser observada na ZTA. A umidade ou o hidrogênio contido nos compostos dos fluxos ou nas superfícies dos arames ou do metal de base introduzem o hidrogênio na poça de fusão. Assim, a poça de fusão e o cordão de solda já solidificados comportam-se como uma espécie de reservatório de hidrogênio dissolvido. A partir da poça de fusão, o hidrogênio se difunde do cordão de solda para as regiões adjacentes da ZTA que foram reaquecidas até formar austenita. Como resfriamento da solda, a austenita se transforma, dificultando a difusão posterior do hidrogênio. A fissuração conhecida como “trinca induzida” é causada pelo hidrogênio retido nessa região adjacente ao cordão de solda. A Figura 2.14 nos mostra uma trinca induzida por hidrogênio na sua forma típica.

Figura 2.14 | Trinca induzida por hidrogênio na ZTA

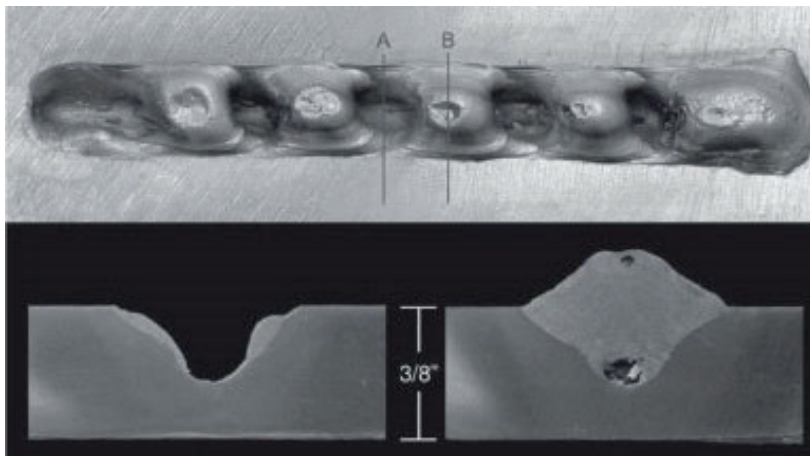


Fonte: adaptado de Paredes [s.d.].

d) Inclusões: esse defeito se deve a pequenas partículas que se depreendem do eletrodo ou fluxo, formando inclusões no cordão de solda. Não são defeitos de elevada gravidade, mas devem ser evitados. Cuidados com a limpeza favorecem a não ocorrência desse tipo de defeito. Soldas de ligas não ferrosas e até mesmo de aço inoxidável podem sofrer um tipo de inclusão de óxidos, gerada por gases de proteção inadequadamente selecionados para a proteger a solda.

e) Crateras: a partir dos grãos presentes nos contornos de fusão, os grãos crescem preferencialmente no metal de solda, afastando-se da interface entre o metal líquido e o metal de base na direção oposta ao escoamento de calor. Um movimento da fonte de calor produz, em alguns pontos da solda, um contorno em forma de lágrima que tem a cauda posicionada na direção oposta ao movimento, sendo que a mesma aumenta à medida que se eleva a velocidade de soldagem. A poça fundida solidifica com um vazio que é denominado cratera, caso a fonte de calor for repentinamente removida. A cratera está sujeita a conter trincas de solidificação na forma de estrela. A Figura 2.15 a seguir nos mostra uma cratera típica em solda.

Figura 2.15 | Cratera em solda



Fonte: adaptada de Schwedersky, Mateus B. et al. (2011).

Tensões residuais na soldagem e formas de alívio de tensões

Na soldagem por fusão a arco, a região fundida (localizada) eleva-se de temperatura de forma brusca e, como em todo processo de transformação de sólido para líquido, há uma dilatação do material (aumento de volume) na zona de fusão. Nas adjacências dessa região, porém, o metal afetado pelo calor também dilata (além de estar sujeito a ocorrência de distorções), mas o aumento de volume é restringido e, dessa forma, cria-se, internamente no material, uma tensão de compressão devido ao aquecimento.

Ao encerrar a solda, ocorre o resfriamento e o material tende a se contrair. A princípio ocorre um alívio de tensões, mas a estreita região aquecida que estava sob tensão de compressão tem uma limitação nessa contração e passa a ficar sob tensão de tração. Essa tensão de tração do resfriamento é a tensão residual da soldagem. Vale dizer que a tensão residual da soldagem tem uma magnitude tal que é igual ao próprio limite de escoamento do material na temperatura ambiente, ou seja, são tensões elevadíssimas (ZEEMAN, 2003, p. 1).

Essas tensões residuais de caráter de tração são as fontes principais geradoras de trincas. Assim, é sempre importante reduzir ao máximo o nível de tensões residuais no material soldado. Uma das formas de reduzir a ocorrência desse defeito é a partir da realização do tratamento de alívio de tensões que veremos a seguir.

A aplicação de um pré-aquecimento no metal a ser soldado faz com que a taxa de resfriamento pós-soldagem seja mais lenta e, com essa diminuição da velocidade de resfriamento, as tensões internas ganham tempo e espaço para se acomodarem, reduzindo a possibilidade de ocorrência de tensões residuais (características de resfriamentos mais rápidos).

Pode acontecer de as tensões residuais somarem às outras tensões que surgem durante o processo de soldagem (aquecimento/resfriamento). Nesse caso, o material poderá escoar e a tensão final chega a se igualar ao limite de resistência do material. Por outro lado, pode não ocorrer o escoamento do material, provocando ruptura do mesmo pelo surgimento de trincas (aqui observa-se que as tensões totais que atuam no material – inclusive as residuais – se

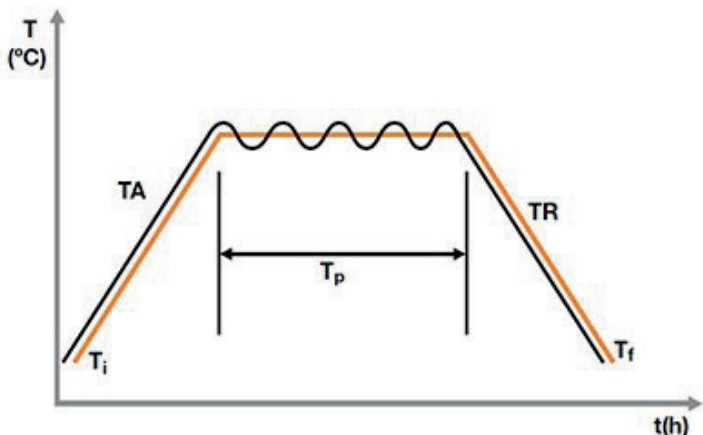
somam e ultrapassam o limite de resistência do material, fazendo-o entrar em colapso).

As tensões residuais em juntas soldadas devem ser aliviadas nos seguintes casos (ZEEMAN, 2003, p. 3).

- Em aços temperados e revenidos;
- Em aços e ligas que apresentam alta relação $\frac{\sigma_e}{\sigma_R}$, em que σ_e é o limite de escoamento e σ_R é o limite de resistência;
- Componentes de grandes espessuras (> 2");
- Componentes sujeitos a carregamentos críticos. Em elementos estruturais, o carregamento crítico pode ser definido como a carga máxima que uma viga, eixo ou coluna suporta antes de flambar; em solda podemos dizer que carregamento crítico é aquele em que a solda tem seu limiar de fratura ou trinca (ou até mesmo escoamento) e;
- Ligas susceptíveis à corrosão sob tensão.

Há dois tratamentos possíveis de se realizar para alívio de tensões: um é de caráter térmico, que é o "tratamento térmico de alívio de tensões", como mostra a Figura 2.16; e o outro mecânico, conhecido como "martelamento" (ZEEMAN, 2003, p. 3).

Figura 2.16 | Tratamento térmico de alívio de tensões na soldagem



Fonte: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/tratamento_termico_alivio_tensoes_soldagem.cfm>. Acesso em: 26 abr. 2018.

No gráfico da Figura 2.16 temos que TA é a Taxa de Aquecimento; TR é a Taxa de Resfriamento; T_i é a Temperatura inicial; T_f é a Temperatura final; e T_p é o Tempo de Patamar.



Reflita

Temos que o martelamento é um processo mecânico de deformação dos materiais que gera encruamento e aumento de discordâncias, que são responsáveis por aumentar a dureza de um material. Sendo assim, como você explicaria ser o martelamento uma das formas de aliviar as tensões residuais em soldagem?

Em condições práticas, a temperatura de tratamento térmico (temperatura do patamar) a ser alcançada deve ficar entre 590 a **650°C** para aços carbono comuns e aços manganês. O tempo de permanência nessa temperatura deve ser de cerca de 1 (uma) hora para cada espessura de 1" (25,4 mm), ou seja, o tratamento deve ser realizado nesse intervalo de temperatura e deve permanecer neste em função de sua espessura, ou seja, a cada polegada de espessura deixar em tratamento 1 hora (50 mm – 2 horas, e assim por diante), de acordo com Urtado e Gimenez (2017).

Observar, no entanto, que se temperaturas altas como **600°C** forem impraticáveis, podem ser empregadas temperaturas mais baixas com um tempo de encharcamento/permanência mais longo no tratamento (EASB, 2005, p. 16).

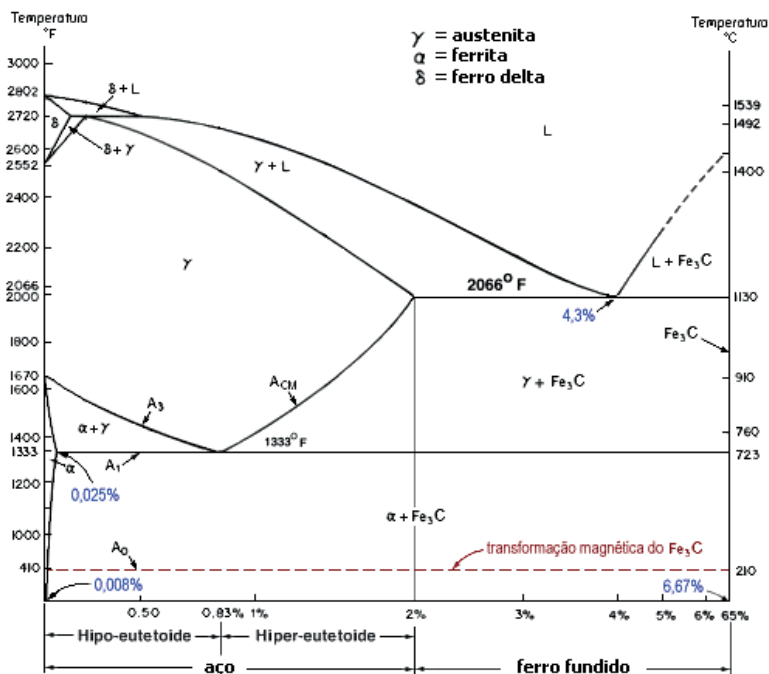
Influência do carbono na soldabilidade de metais. Diagrama Fe-C

O elemento químico de ligas metálicas que exerce maior influência na soldagem é o carbono. Nas ligas Fe-C, que incluem os aços e ferros fundidos, é justamente o carbono que determina a maior ou menor soldabilidade dessas ligas. Essa influência é tal que para teores de carbono igual ou menor que 0,4% (em peso) a solda pode ser realizada com facilidade. Porém, ao aumentarmos esse teor de carbono para valores mais elevados a facilidade em soldar diminui significativamente.

Você pode estar perguntando: por que o carbono tem essa influência tão grande na soldabilidade?

Um forma de visualizar a resposta a essa pergunta está na análise do diagrama Fe-C (também conhecido como Diagrama $Fe-Fe_3C$) apresentado na Figura 2.17 a seguir.

Figura 2.17 | Diagrama ferro-carbono (Fe-C)



Fonte: <https://www.cimmm.com.br/portal/material_didatico/6434-diagramas-fe-fesub3subc#.WuycyogvzIU>. Acesso em: 4 maio 2018.

O que se pode observar do diagrama Fe-C é que elevando-se a concentração de carbono, aumenta a formação de cementita (Fe_3C), uma microestrutura de elevada dureza que contribui para a fragilidade do aço e diminui sua soldabilidade. Além disso, aços de baixo carbono ($\%C < 0,4\%$) permitem que o carbono difunda-se na estrutura cristalina do material com maior facilidade (maior solubilidade), ao passo que elevando-se o teor de C, sua difusibilidade na rede cristalina cai sensivelmente, e o material fica mais difícil de ser soldado.

Outro fator que afeta a realização da solda é que, para termos um aço de boa soldabilidade, é fundamental que ocorram o mínimo de transformações de fases da estrutura cristalina. Assim, aços de elevado teor de carbono ou aços ligados exigem maiores temperaturas para sua fusão e, conseqüentemente, ocorrem mais transformações de fases tanto no aquecimento como no resfriamento da solda, afetando negativamente a qualidade da mesma.



Assimile

O carbono e elementos de liga, tais como Ni, Cr, V, W, entre outros, influenciam de forma significativa a soldabilidade das ligas que os contém, dificultando (e em alguns casos impossibilitando) a realização da solda.

Macroestrutura de soldas por fusão

Fazendo uma avaliação macroestrutural da solda, podemos identificar três regiões com características metalúrgicas distintas: a zona fundida (ZF), que sofreu fusão e é a região de formação da poça; a zona termicamente afetada (ZTA), ou zona afetada pelo calor (ZAC); e o metal base (MB). Macro e microestruturalmente são regiões bastante singulares, mas que, no conjunto, devem apresentar propriedades aproximadamente iguais.

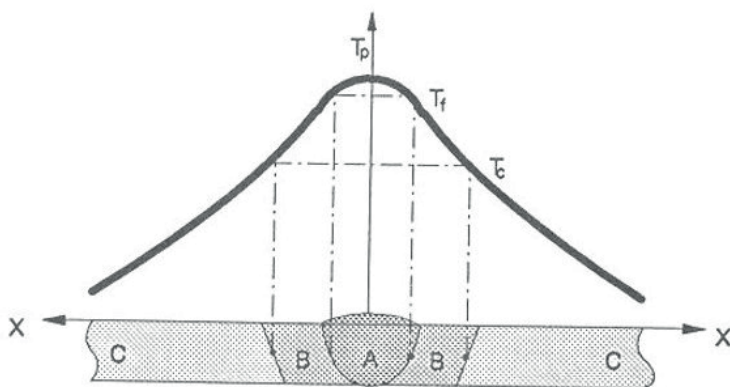
A ZF é a região na qual o material fundiu-se e, posteriormente, solidificou-se após a realização da soldagem. As temperaturas nesta região são superiores à temperatura de fusão do material (T_f) e pode ocorrer uma série de inclusões de outros elementos químicos que vão influenciar no resultado final da soldagem. O processo de resfriamento é de vital importância para a macroestrutura final da solda, pois um resfriamento inadequado (sem controle) potencializa a ocorrência de diversas falhas na solda e macros e microsegregações indesejadas.

Na ZTA, embora não ocorra fusão, pode ocorrer transformações de fases no estado sólido, modificando radicalmente a microestrutura original do metal base (na maioria das vezes de forma indesejável). Na região do metal base (MB) por sua vez, os níveis de temperatura

não se elevam de forma a permitir transformações de fases, tornando essa região livre dos efeitos do calor gerado no processo de soldagem.

Em linhas gerais, temos que é o ciclo térmico de soldagem que determina, predominantemente, as mudanças estruturais que uma determinada região do material pode sofrer devido a realização da solda. A Figura 2.18 a seguir mostra um exemplo de distribuição de temperaturas na soldagem.

Figura 2.18 | Perfil de distribuição de temperatura na soldagem e áreas afetadas

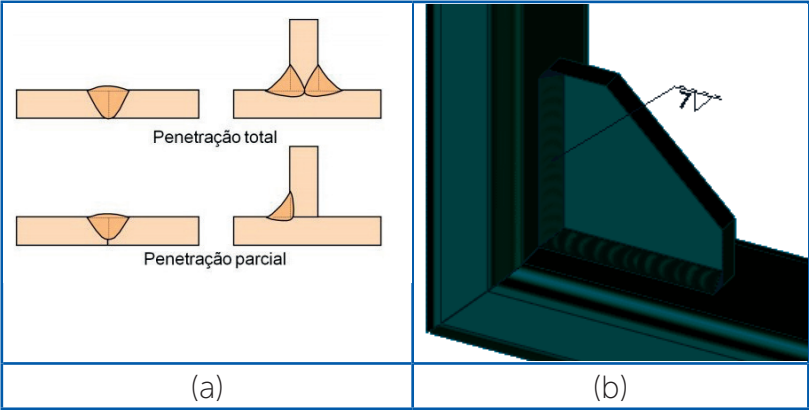


Fonte: ESAB. Metalurgia da Soldagem (2005, p. 40).

Na Figura 2.18 podemos destacar as seguintes marcas: T_p é a temperatura de pico; T_f é a temperatura de fusão; T_c é a temperatura crítica (na ZTA); A é a poça de fusão (posterior cordão de solda); B é a ZTA e; C é o metal base.

No que diz respeito a morfologia do cordão de solda, há basicamente dois tipos de cordão: os de filete e os de entalhe de penetração total ou parcial, conforme ilustra a Figura 2.19 a seguir.

Figura 2.19 | Morfologia de cordão de solda

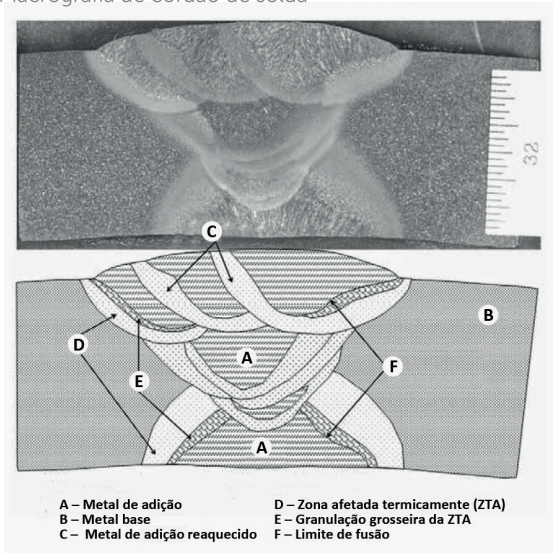


Fonte: (a) Modenesi, (2008, p. 3); (b) Solidworks [s.d.].

A composição final do metal (cordão) de solda é o de uma mistura entre a composição do eletrodo ou do metal de adição fundido e o metal de base, que também é fundido.

Ainda referente à morfologia do cordão de solda, uma técnica importante é a metalografia, que permite avaliar sua forma e macroestrutura. A Figura 2.20 mostra uma macrografia de uma seção transversal da solda de um trocador de calor.

Figura 2.20 | Macrografia de cordão de solda



Fonte: <<http://inspecaoegypto.blogspot.com.br/2014/05/>>. Acesso em: 4 maio 2018.

A imagem da Figura 2.20 permite observar que houve diversos passes de solda, e que em cada cordão formado por um passe de solda nota-se uma estrutura de grãos alongados direcionados para as bordas do cordão.



Pesquise mais

A fim de aprofundar seus conhecimentos referente à soldagem, recomenda-se estudar o capítulo 8b "Solidificação da Poça de Fusão", p. 371-386 do livro *Soldagem - Processos e Metalurgia* de Emilio Weiner, Sérgio Duarte Brandi e Fábio Décourt Homem de Mello. Boa pesquisa.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem** – Processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015.

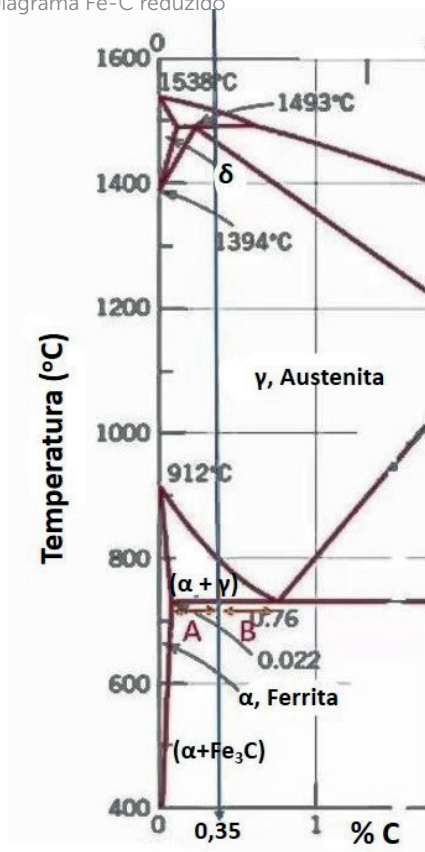
Vamos agora verificar um exemplo de aplicação no nosso *Exemplificando*.



Exemplificando

Vamos supor que um cordão de solda de um aço esteja em processo de solidificação, partindo da zona fundida em um resfriamento controlado (lento) cuja composição do cordão seja equivalente à de um aço com 0,35%C não microligado. Considerando as condições de resfriamento estabelecidas, qual seria a composição microestrutural da solda, com base no diagrama Fe-C apresentado na Figura 2.21 a seguir?

Figura 2.21 | Diagrama Fe-C reduzido



Fonte: adaptado de <https://www.youtube.com/watch?v=JjjirY1_Jlo>. Acesso em: 4 maio 2018.

Solução:

Um aço com 0,35% de carbono (ver linha vertical no gráfico), ao ser aquecido bruscamente e fundido até cerca de $1600^{\circ}C$ atravessa os campos de fases indicados no diagrama. Ao ser resfriado, a curva de resfriamento não é a mesma do aquecimento, pois ela tem um comportamento diferente, com declínio suave (visto que o resfriamento é controlado) passando por diversas transformações de fases. Não é objetivo aqui mostrar o diagrama de resfriamento, mas ao resfriar obrigatoriamente as seguintes fases deverão fazer parte da microestrutura da solda: ferrita (ferro α) e $(\alpha + Fe_3C)$ que é a perlita.

Sem medo de errar

Caro aluno, lembrando que um setor de soldagem de uma metalúrgica que trabalha com aços inoxidáveis vem detectando problemas nos cordões de solda das chapas soldadas, temos que uma dessas falhas vem ocorrendo na solda de peças de aço inoxidável ferrítico de grandes reservatórios para armazenar produtos especiais líquidos.

O aço em questão é aço inoxidável ferrítico do tipo ABNT430, cuja composição é de 0,03% C, 0,9% Mn, 0,7% Si e 17,3% Cr.

Cabe a você determinar qual o aço de carbono equivalente é recomendado e, com base no diagrama Fe-C, quais as microestruturas esperadas na zona de solda durante o resfriamento.

Em primeiro lugar vamos ao cálculo do carbono equivalente usando a expressão fornecida:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3}$$

$$CE = 0,03 + \frac{0,9}{6} + \frac{0}{4} + \frac{17,3}{5} + \frac{0}{15} + \frac{0}{15} + \frac{0}{3}$$

$$CE = 3,64\%$$

Note que, pelo carbono equivalente (3,64% de carbono), o material alternativo não teria boa soldabilidade (cairia na faixa dos ferros fundidos). Um valor de carbono equivalente elevado não é indicador de que o aço não é soldável, mas sim de que são necessários cuidados cada vez maiores, como um pré-aquecimento em temperaturas em torno de **200°C** (ou mais).

Fazendo uma pesquisa na literatura ou mesmo na internet é possível encontrar outras expressões para cálculo do carbono equivalente, tal como a expressão a seguir:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Essa expressão, que é a fórmula indicada pelo IIW (*International Institute of Welding* – Instituto Internacional de Soldagem, pode ser encontrada no artigo científico intitulado *Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações*, disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242013000200011>. Acesso em: 6 maio 2018.

Fazendo o cálculo do carbono equivalente usando esta expressão teremos:

$$CE = 0,03 + \frac{0,9}{6} + \frac{17,3 + 0 + 0}{5} + \frac{0 + 0}{15} = 3,64 \%$$

Note que o resultado foi igual ao obtido anteriormente.

Essas duas fórmulas de CE não são aplicáveis para um aço com teor de carbono tão baixo, como o ABNT430. Há uma terceira fórmula conhecida como Fórmula de Ito-Bessyo (Soeiro Jr et al, 2013) que é a recomendada para aços com menos de 0,12%C. Tal fórmula é a seguinte:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Mn}{20} + \frac{\%Cu}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Cr}{20} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + 5\%B$$

Usando essa expressão para nosso aço teremos:

$$CE = 0,03 + \frac{0,7}{30} + \frac{0,9}{20} + \frac{17,3}{20} = 0,963\%$$

Conclui-se, portanto, que a fórmula do Ito-Bessyo fornece o melhor valor para o carbono equivalente do aço ABNT430. As outras expressões que aqui aplicamos só são úteis para aços com maiores teores de carbono (acima de 0,12%).

Veja que para calcular o CE e indicar o aço alternativo ao ABNT430 você fez uso de toda a sua capacidade de raciocínio crítico e de resolução de problemas, além da sua enorme curiosidade na busca de expressões alternativas para cálculo de CE.

Como você está trabalhando com um aço inoxidável ferrítico, um aço com 0,963%C teria uma soldabilidade difícil (mas não impossível) por causa do elevado teor de carbono. O aço ABNT430, apesar de ser um aço inoxidável, tem ferrita na sua microestrutura enquanto que o aço carbono com 0,963%C teria martensita (possível de ser observado no diagrama Fe-C).

Considerando a presença de ferrita no aço ABNT430, uma velocidade de resfriamento controlada garantiria menos martensita na estrutura do que poderia ocorrer no aço 0,963%C.

Assim, finalizando sua análise, não seria interessante substituir o aço ABNT430 por um aço carbono comum com 0,963%C. Os cálculos e suas conclusões você irá entregar a sua chefia imediata, consubstanciado em um relatório técnico.

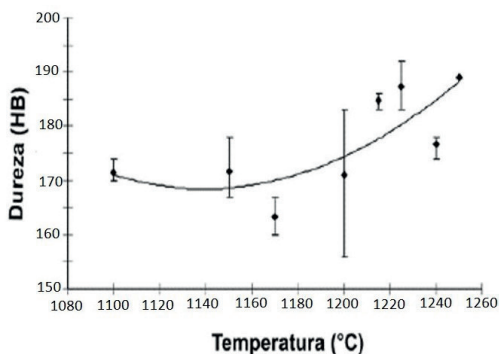
Avançando na prática

Determinação da temperatura de alívio de tensões em uma solda

Descrição da situação-problema

Um determinado cordão de solda de um aço apresentou o seguinte gráfico de dureza em função da temperatura de solubilização, mostrado na Figura 2.22.

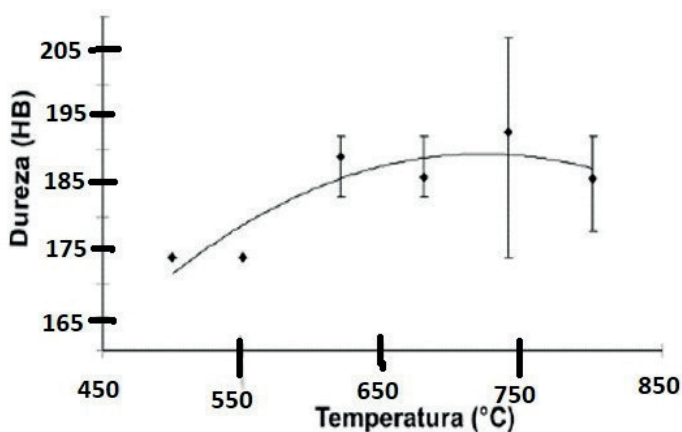
Figura 2.22 | Gráfico de dureza em função da temperatura de solubilização



Fonte: adaptada de Ritoni et al. (2007).

Considerando que a solda desse aço precisou passar por um tratamento de alívio de tensões, indicado no gráfico mostrado na Figura 2.23.

Figura 2.23 | Gráfico de dureza (HB) em função da temperatura de alívio de tensões em uma solda



Fonte: adaptada de Ritoni et al. (2007).

Você terá que decidir (indicar) qual a melhor temperatura de alívio de tensões a ser utilizada, combinada com máxima temperatura de solubilização.

Resolução da situação-problema

Pode-se observar que no primeiro gráfico a máxima temperatura de solubilização está entre 1240 e **1260°C** – onde temos o maior nível de dureza (algo próximo de 190 HB).

Para aliviar toda essa tensão provocada por essa dureza elevada, o segundo gráfico nos indica que para temperaturas abaixo de **550°C**, o nível de dureza cai para algo próximo de 175 HB (ou seja, uma diminuição de 15 HB ou -7,9%).

Portanto, há de se recomendar um tratamento de alívio de tensões a uma temperatura de **550°C** para uma temperatura de solubilização de **1260°C**.

Faça valer a pena

1. O tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) em soldas tem, por norma (recomendação), que ser realizado em temperaturas abaixo da temperatura A_1 do diagrama Fe-C, algo em torno de 580 a 650°C .

Assinale a alternativa correta a seguir:

- a) O TTAT deve ser realizado abaixo de A_1 porque assim não ocorrem transformações de fases (pois essas transformações de fases não são desejadas).
- b) O TTAT deve ser realizado abaixo de A_1 porque logo acima dessa temperatura o aço sofre nova fusão.
- c) O TTAT deve ser realizado abaixo de A_1 porque nessa temperatura ocorrem algumas mudanças de fases desejáveis para o alívio de tensões.
- d) O TTAT deve ser realizado abaixo de A_1 porque são eliminados todos os defeitos da solda.
- e) O TTAT deve ser realizado abaixo de A_1 , pois caracteriza o revenimento da solda.

2. Considere os seguintes tipos de defeitos de soldagem:

- A) Porosidade
- B) Trinca de Solidificação
- C) Inclusões
- D) Trincas Induzidas

Tais defeitos caracterizam-se por:

- I) É mais comum de ser observada na ZTA devido a difusão de hidrogênio.
- II) Originam-se a partir de partículas do eletrodo ou do fluxo.
- III) Defeito interno à solda formando entalhes que levam a falha por fadiga.
- IV) Típicas em aços altamente ligados e em ligas não ferrosas soldadas com eletrodos ou com metal de adição de diferentes composição química do metal base.

Marque a alternativa que relaciona corretamente o tipo de defeito com sua característica.

- a) A-II; B-I; C-III; D-IV.
- b) A-I; B-IV; C-III; D-II.
- c) A-IV; B-II, C-I; D-III.
- d) A-III; B-IV; C-II; D-I.
- e) A-IV; B-III; C-I; D-II.

3. Quando estamos tratando de tensões internas em soldas, dentre as medidas para evitá-las podemos aplicar um pré-aquecimento no metal a ser soldado. Isso faz com que a taxa de _____ seja mais lenta e, com essa diminuição da velocidade de _____, as tensões internas ganham tempo e espaço para se acomodarem, _____ a possibilidade de ocorrência de tensões residuais.

Assinale a alternativa que completa corretamente o texto-base acima.

- a) resfriamento – resfriamento – aumentando.
- b) resfriamento – aquecimento – diminuindo.
- c) resfriamento – resfriamento – diminuindo.
- d) aquecimento – resfriamento – diminuindo.
- e) aquecimento – resfriamento – aumentando.

Seção 2.3

Equipamentos e acessórios de soldagem convencional

Diálogo aberto

Caro aluno, chegamos na terceira seção desta unidade, em que você irá estudar e conhecer máquinas de solda, tipos e funções de consumíveis, fontes de corrente, métodos de soldagem e solda de manutenção. Esses tópicos compõem um conjunto de conhecimentos de soldagem fundamental para um profissional da área metalúrgica e mecânica. Atualmente é comum vermos caçambas estacionadas em frente de prédios em construção ou em reformas; tais caçambas suportam uma carga elevada de entulhos e boa parte de sua estrutura é soldada. Tal solda deve ser bem executada para suportar tais condições de operação. Existem diversos outros exemplos de aplicação, como na indústria petroquímica, automotiva, eletrônica, dentre outras.

A fim de contextualizar esses conceitos, lembre-se que a empresa na qual você trabalha, uma grande prestadora de serviços de soldagem, passará a fabricar e fornecer caçambas de caminhão a partir de chapas soldadas, após finalizar o seu processo de reestruturação geral, e implementar o programa de capacitação e treinamento dos novos funcionários da área de soldagem e da área de controle de qualidade. Considerando que o setor de soldagem é ativo e atende uma grande variedade de clientes, temos que você foi designado para, entre outras coisas, especificar qual a chapa de aço mais adequada para construir a caçamba, assim como estipular quais consumíveis, máquina e método de soldagem mais adequados para a estrutura soldada de uma caçamba de caminhão.

Você terá os seguintes desafios para chegar a uma solução:

- (i) qual chapa deverá ser usada? (ii) qual máquina de solda será utilizada? (iii) qual o tipo de consumível que você irá especificar? (iv) qual será o melhor método de soldagem a ser aplicado?

Estruturas soldadas de caçambas devem suportar grandes cargas e impactos e, também, devem ser resistentes às intempéries do tempo (chuva, umidade) e, sendo assim, como você imagina que

seriam realizadas as manutenções periódicas dessas caçambas, pensando na integridade das zonas soldadas?

Tal tarefa irá exigir de você usar ao máximo sua capacidade de raciocínio crítico e resolução de problemas. As questões aqui colocadas poderão ser respondidas com base nos conteúdos mobilizados nesta seção, que são de fundamental importância para o profissional que trabalha com soldagem. Ao final da solução deste desafio, caberá a você entregar ao seu chefe um relatório com as suas conclusões.

Você está pronta para esse novo desafio? Dedique-se aos estudos e amplie seus conhecimentos! Bom trabalho!

Não pode faltar

Máquinas de soldagem

Os equipamentos de soldagem apresentam-se nos mais diversos modelos e com os mais diversos acessórios, e essas variações dependem do fornecedor (ou fabricante). As máquinas de soldagem vão desde aquelas mais compactas (possíveis de serem transportadas manualmente – soldas inversoras) até aquelas de grande porte, como é o caso das máquinas de solda por arco submerso. Há ainda os equipamentos para soldagem automatizada (os robôs).

Na soldagem a arco elétrico por fusão, as máquinas de solda fornecem ao circuito elétrico a tensão e a corrente necessária para ignição e estabilidade do arco elétrico. Entre as máquinas de soldagem destacam-se três básicas: (i) transformadores, (ii) geradores e (iii) retificadores. A primeira é responsável por fornecer corrente alternada à soldagem e as duas últimas fornecem corrente contínua. Os transformadores podem ser monofásicos ou trifásicos, alimentados por tensões de 110, 220, 380 e 440 volts (V).

Entre as principais vantagens dos transformadores, temos a eliminação de ocorrência de sopro magnético (que é um fenômeno de desvio do arco de solda, devido a variações magnéticas provocadas pela corrente elétrica), além de ser um equipamento de custo e manutenção baixas.

As desvantagens de utilização dos transformadores residem no fato de desequilibrarem a rede de alimentação, a tensão em vazio da

máquina precisa ser constantemente elevada (a fim de possibilitar o reaquecimento do arco elétrico) e não pelo fato de não poderem ser usados com eletrodos de baixa ionização.

Apenas para esclarecer o conceito, a tensão em vazio (U_0) é o valor fornecido pela fonte na ausência de qualquer carga (isto é, sem passagem de corrente). A corrente de curto-circuito (ICC) é o valor desta no caso de um curto (MODENESI, 2009, p. 4).

Os transformadores são muito aplicados em grandes equipamentos de solda. Porém, existem as máquinas inversoras de solda, que são tecnologicamente mais avançadas pois facilitam, em muito, os trabalhos de manutenção. São equipamentos leves e fácil de se transportar para locais que exigem manutenção, nos quais seria impossível levar máquinas de grande porte. Por exemplo, em operações em telhados para reparos de estruturas de treliças, em que é possível levar a máquina até o local sem grandes dificuldades.

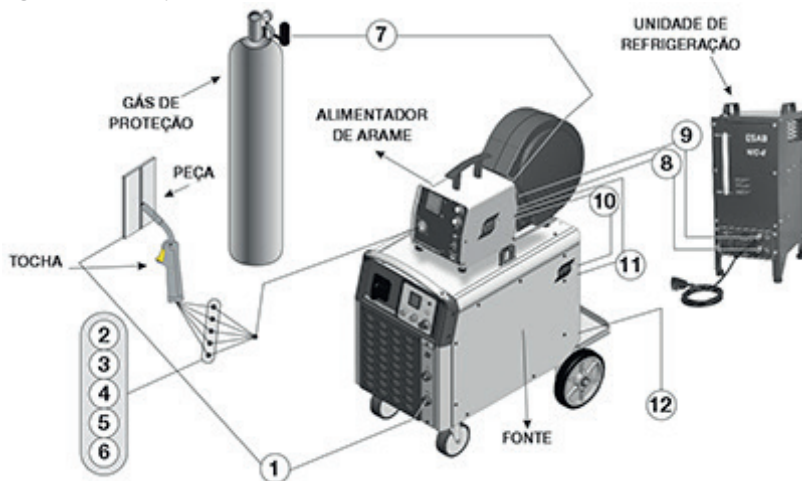
Em termos tecnológicos, a máquina inversora de solda possui circuitos eletrônicos que facilitam as mudanças de tensão e de corrente, possibilitando trabalhar com uma maior variedade de tipos de eletrodos. Possuem displays digitais que facilitam a regulação das variáveis dos processos de soldagem.

Os geradores são máquinas rotativas que possuem um motor elétrico ou de combustão interna acoplado à um gerador de corrente contínua. São ótimos para trabalhar por longos tempos de operação.

Os retificadores são, basicamente, transformadores trifásicos que permitem a passagem de corrente em um único sentido, convertendo CA em CC.

Vamos conhecer os itens básicos que compõem algumas máquinas de soldagem tradicionais. Para tanto, vamos nos ater no esquema mostrado na Figura 2.24, que ilustra um sistema de soldagem semiautomática para aplicação do processo MIG-MAG.

Figura 2.24 | Máquina de soldar semiautomática

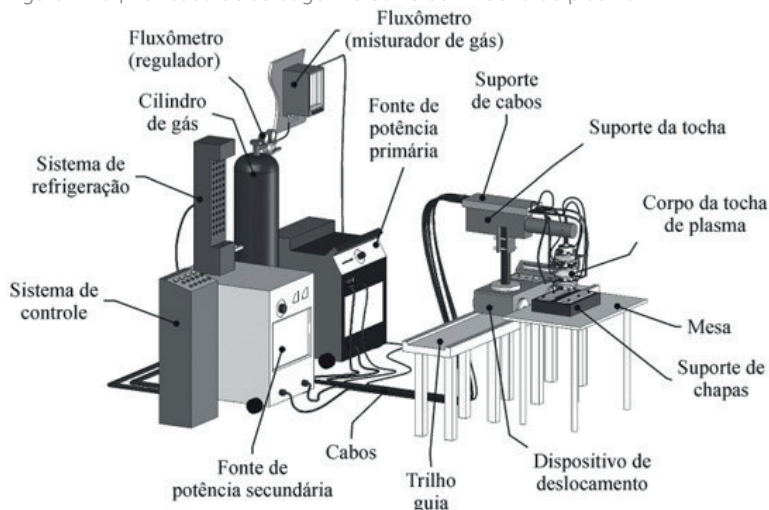


Fonte: ESAB. Disponível em: <http://www.esab.com.br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm>. Acesso em: 10 maio 2018.

Na Figura 2.24 temos os seguintes acessórios: (1) cabo de solda [negativo]; (2) refrigeração da tocha – entrada de água; (3) gás de proteção; (4) gatilho da tocha; (5) refrigeração da tocha – retorno água; (6) conduto do arame; (7) gás de proteção vindo do cilindro; (8) saída de água de refrigeração; (9) entrada de água de refrigeração; (10) cabo de comando/alimentador fonte; (11) cabo de solda – positivo; (12) conexão para a fonte primária – 220/380/440 VCA, ou seja, voltagem em corrente alternada.

Uma bancada típica para soldagem e corte com tocha de plasma é ilustrada na Figura 2.25 a seguir. Na soldagem elétrica (a arco) a tocha de plasma é um dispositivo que transforma energia elétrica em calor transportado por um gás.

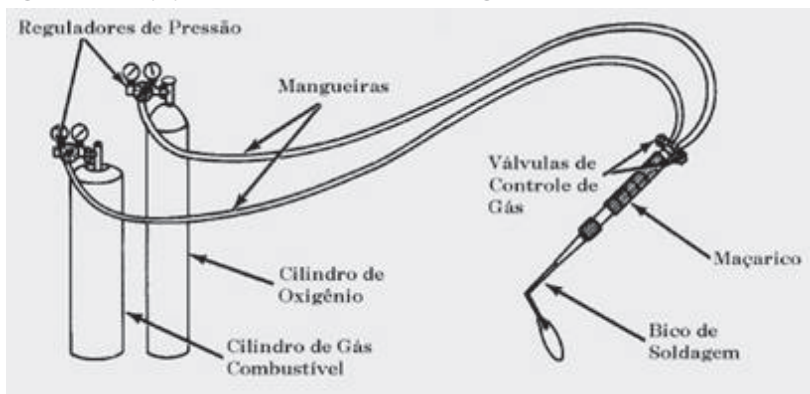
Figura 2.25 | Bancada de soldagem e corte com tocha de plasma



Fonte: adaptada de Lermem e Machado (2012, p.320). Disponível em: <<http://www.scielo.br/img/revistas/si/v17n4/a06fig04.jpg>>. Acesso em: 10 maio 2018.

No caso de um equipamento de solda oxi-gás (em que a solda é realizada a base de oxigênio (oxi) e um gás, geralmente acetileno), os elementos básicos são mostrados na Figura 2.26:

Figura 2.26 | Equipamentos básicos de solda oxi-gás



Fonte: adaptada de MMBorges. Disponível em: <http://mmborges.com/processos/Uniao/uniao%20termica%20-%20soldagem_arquivos/image011.jpg>. Acesso em: 10 maio 2018.

Tipos e funções de consumíveis

Consumíveis de soldagem são, como o próprio nome diz, produtos que são consumidos durante a realização da solda.

Dentre os principais consumíveis podemos citar: arame, vareta, eletrodo, gases, fluxos, etc. Vamos ver brevemente cada um deles e suas funções.

a) Arames: é o elemento de soldagem (bobinado), que formará a liga da solda. Sendo assim, é necessário que o material do fio do arame seja o mesmo do metal base a ser soldado. Assim, para soldar aço inoxidável usa-se arame (fio) de aço inoxidável; e para soldar alumínio e suas ligas, utiliza-se arame (fio) de alumínio. Alguns elementos extras são adicionados na composição do arame para proteger a solda. Por exemplo, manganês, silício e titânio no arame auxiliam no processo de desoxidação da solda. Os arames de soldagem são muito utilizados no processo de soldagem MIG-MAG.

Alguns arames são revestidos com materiais de determinados elementos com a finalidade, sempre, de proteger a solda. É o caso de arames revestidos de cobre (fios de aço revestidos de cobre) que protegem a solda de eventuais oxidações.

Os arames podem também ser do tipo sólido ou tubular. Podem ser nus ou revestidos.

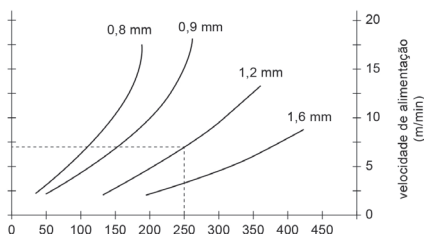
Um fator importante a ser considerado na seleção do arame de solda é a sua espessura (diâmetro). Fabricantes incluem gráficos de espessuras de arame nas embalagens e catálogos de seus produtos, a fim de orientar na adequada seleção.



Exemplificando

O diâmetro do arame de soldagem depende de variáveis como intensidade de corrente (A) e velocidade de alimentação (mm/min). Fabricantes inserem essas informações em catálogos gráficos, como o mostrado na Figura 2.27.

Figura 2.27 | Diâmetro de arame em função de corrente (A) e velocidade de alimentação (mm/min).



Fonte: Servsolda. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/images/imagens-artigos/Processos/gmaw/gmaw1.jpg>>. Acesso em: 16 maio 2018.

Note que, para intensidades de corrente mais elevadas, necessita-se de arames de diâmetro mais robusto; por outro lado, consegue-se altas velocidades de alimentação quando se usa arames de pequeno diâmetro e baixa amperagem.

b) Varetas: são pequenos cilindros metálicos no formato de varetas (imagine um grafite de lapiseira em tamanho ampliado) que também podem ser nus ou revestidos. As varetas são muito utilizadas na soldagem TIG como metal de adição, propiciando uma ótima qualidade de acabamento. Podem ser de aço carbono, aço de baixa liga, aços inoxidáveis, de alumínio e de cobre. Há, ainda, as varetas que são conhecidas também como eletrodos para solda TIG que não são consumíveis, pois atuam apenas como elemento de condução de corrente elétrica para aquecer o local a ser soldado, auxiliando na fusão da peça a ser soldada.

c) Eletrodos: podem ser nus ou revestidos (mais comum), podendo ser sólidos ou tubulares. A alma do eletrodo (núcleo) é metálica e condutora de eletricidade, está revestida por uma resina que, ao ser aquecida, queima e expulsa o oxigênio no momento da fusão. Durante a soldagem, a alma do eletrodo se funde, o revestimento se desprende e libera gases que protegem a poça de solda do contato com a atmosfera. A resina liberada pelo eletrodo é a responsável pela formação da camada de escória, que tem a função de proteger o cordão de solda de contaminantes e controlar o processo de resfriamento. Os materiais que são mais usados no revestimento dos eletrodos são os seguintes: rutilicos (formado por rutilo, com pequenas quantidades de celulose e ferro-liga), básicos (formado por fluorita, carbonato de cálcio e ferro-liga), ácidos (formado por óxido de ferro e óxido de manganês), oxidantes (formado somente por óxido de ferro) e celulósicos (formado por materiais orgânicos tais como celulose e pó de madeira).

d) Fluxos: são consumíveis que podem ser encontrados na forma líquida, em pó ou em pasta. Sua função principal é a de proteger o cordão de solda de eventuais contaminações e oxidações. Além disso, o fluxo ajuda a diminuir a tensão superficial do metal de adição no estado líquido, favorecendo assim a fluidez da solda. O

fluxo pode estar presente na soldagem oxiacetilênica, em eletrodos tubulares e na solda a arco submerso.

e) Gases: os gases são usados em soldagem para atuarem de diferentes maneiras, de acordo com o tipo de soldagem. Na solda oxiacetilênica (mistura dos gases oxigênio e acetileno) a chama na ponta do bico de solda chega a mais de **3000°C**, sendo resultado da combustão dos gases, o que permite soldar o material com ou sem metal de adição. Na solda MIG/MAG, utiliza-se gases ativos (ar, hidrogênio e **CO₂**) ou inertes (oxigênio e nitrogênio) que protegem a zona da solda de contaminação atmosférica. Na solda TIG, os gases utilizados são os inertes (Hélio, Argônio ou uma mistura dos dois), que têm a função de proteger a poça de fusão de contaminação por oxigênio ou nitrogênio.



Assimile

Consumíveis são todos aqueles acessórios de soldagem que se esgotam após uso (eletrodos, arames, gases, etc.) necessitando haver sempre reposição e/ou estoques desses itens armazenados em condições adequadas e em ambientes apropriados.

O Quadro 2.3 a seguir nos mostra que eletrodos e varetas (consumíveis) possuem elementos de liga que lhes conferem propriedades próprias.

Quadro 2.3 | Os principais elementos de liga em eletrodos e varetas, com suas principais propriedades

Elemento de Liga	Propriedades
Carbono (C)	Aumenta a resistência e o endurecimento; reduz o alongamento, a forjabilidade, a soldabilidade e a usinabilidade; forma carbonetos com cromo (Cr), molibdênio (Mo) e vanádio (V).
Cobalto (Co)	Aumenta a resistência à tração; aumenta a dureza (têmpera total); resiste ao revenimento, ao calor e à corrosão.
Cromo (Cr)	Aumenta a resistência à tração, ao calor, à escamação, à oxidação e ao desgaste por abrasão. É um forte formador de carbonetos.

Elemento de Liga	Propriedades
Manganês (Mn)	Aços austeníticos contendo manganês e 12% a 14% de cromo são altamente resistentes à abrasão.
Molibdênio (Mo)	Aumenta a resistência ao calor e forma, também, carbonetos.
Níquel (Ni)	Aumenta o limite de escoamento; aumenta a tenacidade; resiste aos meios redutores.
Tungstênio (W)	Aumenta a resistência à tração; aumenta a dureza; resiste ao calor; mantém cortante os gumes das ferramentas e peças e forma carbonetos.
Vanádio (V)	Aumenta a resistência ao calor; mantém os gumes cortantes e também forma carbonetos.

Fonte: SENAI-ES (1996, p. 115).

Fontes de corrente de soldagem

Os valores de tensão das fontes são, geralmente, da ordem de 110 a 440 V e, dessa forma, a soldagem não deve ser realizada utilizando-se diretamente a corrente normal da rede, dado o valor elevado da voltagem, que coloca em perigo de vida o operador.

Por sua vez, a corrente de soldagem é muito elevada e deve se observar algumas exigências tais como:

- Trabalhar com tensão em vazio até 70 V para CA e até 100 V para CC;
- A intensidade de corrente deve observar um valor limite no curto-circuito e a voltagem para abrir o arco deve ser atingida de forma rápida.

A soldagem do arco elétrico exige uma fonte de energia capaz de fornecer tensão entre 10 e 40 V (daí a necessidade do transformador em reduzir a tensão de entrada de 110 a 440 V para os valores de 10 a 40 V na saída), e fornecer corrente elétrica entre 10 e 1200 A (ou mais).

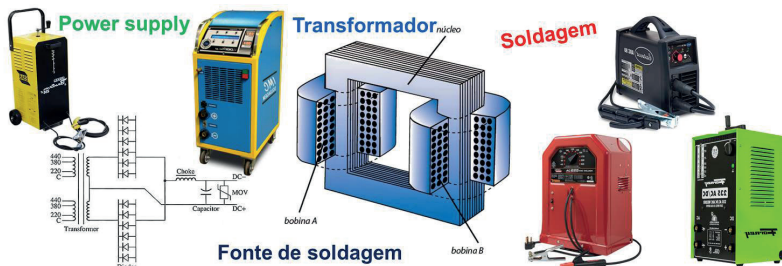
A maioria das máquinas de solda em operação no Brasil ainda são de circuitos convencionais, porém, o uso de máquinas eletrônicas vem se ampliando, devido a maior facilidade de operação (no caso das inversoras de solda) e melhor relação custo/benefício.

Existem três requisitos básicos que uma fonte de energia para soldagem a arco deve atender (MODENESI, 2009, p. 1):

1. Produzir saídas de corrente e tensão nos valores desejados e com características adequadas para o processo de soldagem;
2. Permitir o ajuste destes valores de corrente e/ou tensão para aplicações específicas;
3. Variar a corrente e tensão durante a operação de acordo com os requerimentos do processo de soldagem e aplicação.

A Figura 2.28 a seguir ilustra diversos modelos de fontes de energia para soldagem a arco elétrico.

Figura 2.28 | Fontes de potência para soldagem a arco elétrico



Fonte: Site da Soldagem. Disponível em: <<http://www.sitedasoldagem.com.br/Imagens/fontes-soldagem-arco-eletrico.jpg>>. Acessado em: 12 mai. 2018.

Métodos de soldagem e solda de manutenção

Das várias modalidades de soldagem existentes, a escolha de uma delas depende de alguns fatores tais como: tamanho da peça a ser soldada, tipo de metal, espessura, temperatura de soldagem, tipo de corte de solda, etc. Vamos destacar alguns dos principais métodos, lembrando que esses não esgotam o assunto, pois há diversos métodos:

a) Solda a arco: nesse método, o eletrodo transporta eletricidade (corrente) e gera a solda por fusão do metal. É um dos métodos mais comuns.

b) Solda a arco com gás: usado para soldar peças de dimensões variadas, utilizando uma pistola de solda ou maçarico. Ao apertar o gatilho do dispositivo, a tocha de chama gera um calor suficiente para soldar o metal.

c) Solda TIG – Soldagem com gás inerte: faz uso combinado de vareta de enchimento com tocha (chama). O metal da vareta é derretido pela chama e preenche a solda, ou o mesmo maçarico que gera a tocha de chama funde vareta e metal base, unindo os dois.

d) Soldagem a ponto por resistência: a união entre duas partes ocorre pela passagem de corrente elétrica entre elas, ocasionando a fusão localizada delas. Trata-se de um método que leva pouco mais de um segundo para terminar.



Pesquise mais

Um tópico interessante de se pesquisar são as posições de soldagem. Para tanto, consulte as páginas 6 a 9 do Guia de Soldagem da ESAB, que é um manual que trata das posições de soldagem e suas técnicas. Vale a pena pesquisar e se aprofundar nesse tema. Veja em <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/guia-de-soldagem-arames-tubulares-todas-as-posi%C3%A7%C3%B5es.pdf>> Acesso em: 12 maio 2018. Boa pesquisa!

Por sua vez, a soldagem de manutenção tem uma importância vital nas indústrias metalúrgica e mecânica, pois é ela que garante uma vida útil maior a equipamentos, peças e dispositivos industriais tais como tubulações.



Refleta

Você já parou para pensar como seria em muitas fábricas brasileiras que tem um conjunto de equipamentos de vários modelos, fabricantes, tempo elevado de uso e com muitas peças de reposição “fora de linha”? E se uma dessas peças falhar e não tiver reposição? Poderia ser consertada?

Na soldagem de manutenção, nem sempre é possível saber a composição química da peça a ser reparada, o que implica em restrições e limitações que impactam na decisão do processo de soldagem, que se agravam pela necessidade da realização rápida da operação para pronto reparo da peça danificada.

Em muitos casos, apesar de haver urgência na realização da solda de manutenção, quando é possível disponibilizar um tempo para avaliar a falha ou a futura falha, algumas etapas são consideradas importantes de ser obedecidas. Seriam elas:

- Inspecionar o local da falha;
- Determinar (se possível) a causa da falha: fadiga e fratura, desgaste, corrosão, sobrecarga, etc.;
- Conhecer o funcionamento da peça ou dispositivo: solicitação, ambiente, temperatura, periodicidade, etc.;
- Conhecer ou ter noção dos materiais envolvidos;
- Saber identificar a condição do material: encruado, temperado, cimentado ou submetido a tratamento térmico diverso;
- Finalmente, deve ser realizado um planejamento da execução da soldagem de manutenção.

Vale lembrar aqui que para um bom trabalho de manutenção, um equipamento versátil, tal qual uma inversora de solda, facilita e proporciona ótimas condições de trabalho para o operador.

Sem medo de errar

Caro aluno, lembre-se de que você está trabalhando em uma grande prestadora de serviços de soldagem, que passará a fabricar e fornecer caçambas de caminhão a partir de chapas soldadas, após finalizar o seu processo de reestruturação geral, e implementar o programa de capacitação e treinamento dos novos funcionários da área de soldagem e da área de controle de qualidade.

Nessa etapa, sua atuação na especificação de alguns itens de soldagem vai ser determinante para a empresa. Espera-se, portanto, que você aplique todo seu conhecimento de soldagem, e coloque em prática todas as suas habilidades referentes a raciocínio crítico e resolução de problemas, curiosidade e criatividade. Veja os itens a serem respondidos:

- qual chapa a ser usada?
- qual máquina de solda será utilizada?
- qual o tipo de consumível que você irá especificar?
- qual será o melhor método de soldagem a ser aplicado?

Vejamos as possibilidades para solucionar as questões apresentadas em cada item:

(i) Caçambas são estruturas de elevada resistência e alta capacidade de carga. Além disso, devem ser resistentes às intempéries, de forma a não sofrer corrosão. Sendo assim, é bem possível que um aço estrutural seja o indicado para tal, prevendo-se um tratamento químico superficial (galvanização) a fim de elevar sua resistência à corrosão. Aços estruturais são aços carbono comuns, podendo ser o SAE 1020.

(ii) A máquina de solda mais indicada para a caçamba seria a MIG/MAG. Aqui é interessante que você tenha acesso à catálogos de equipamentos de solda e de consumíveis, para consultar e encontrar os mais adequados. Recomenda-se, por exemplo, o catálogo disponível em <<http://hsoldas.com.br/site/pdf/CatalogoGeralHSoldas.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2018.

(iii) Dentre os possíveis consumíveis, sugere-se utilizar um eletrodo sólido para soldar aço carbono (ER 70S-6 – conforme catálogo indicado acima) utilizando como gás de proteção uma mistura de Ar e CO_2 ou CO_2 puro.

(iv) Quanto ao método de soldagem, que especificamos ser o MIG/MAG, é uma solda a arco elétrico com gás de proteção. Quanto às possíveis posições, devem prevalecer as soldas planas, horizontal e vertical.

Há, ainda, a seguinte questão a ser respondida: estruturas soldadas de caçambas devem suportar grandes cargas e impactos e, também, devem ser resistentes às intempéries do tempo (chuva, umidade) e, sendo assim, como você imagina que seriam realizadas as manutenções periódicas dessas caçambas, pensando na integridade das zonas soldadas?

Temos que levar em conta que o aço estrutural da caçamba (SAE 1020, por exemplo) deveria, à princípio, ser galvanizado, o que nem sempre acontece. Além disso, depois de soldadas, as caçambas passam pelo processo de pintura escondendo as soldas. Nessas condições (ideais): aço galvanizado, solda especificada e executada corretamente, e com a pintura realizada, a manutenção da caçamba pode ser periódica (deve se especificar um intervalo de tempo – a cada seis meses, por exemplo) para uma inspeção visual das partes soldadas.

Note que para solucionar esta problematização, você utilizou todo o conteúdo mobilizado nesta seção. Cabe agora a você entregar um relatório sintetizando sua avaliação ao seu gerente.

Nota importante: na solução de problemas envolvendo soldagem, além dos conhecimentos adquiridos em sala de aula e em prática de laboratório, há a necessidade de se ter disponível catálogos de fabricantes para consulta, pois os mesmos são indispensáveis para essas situações. Os catálogos podem indicar soluções alternativas, pois nem sempre há uma única solução para o problema em questão.

Avançando na prática

Seleção de diâmetro de consumível

Descrição da situação-problema

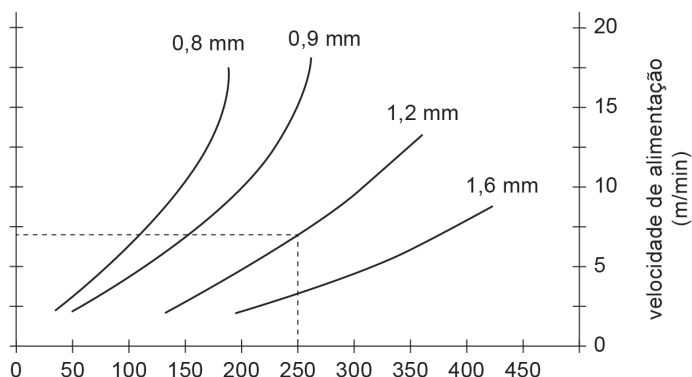
Em uma metalúrgica que trabalha com produtos estruturados a partir de chapas soldadas, na qual você trabalha, há a necessidade de soldar uma chapa de aço carbono de baixa liga, utilizando uma corrente a 200 A. Para selecionar o diâmetro do consumível, você dispõe da Tabela 2.4 e do gráfico apresentado na Figura 2.29. Qual seria o diâmetro de eletrodo mais indicado?

Tabela 2.4 | Material a ser soldado e os correspondentes diâmetros de eletrodos e faixa de amperagem recomendados

Material	Diâmetro do eletrodo	Faixa de corrente
Aço carbono e de baixa liga	0,8	70 - 180
	1,0	90 - 220
	1,2	100 - 270
	1,6	190 - 360
	2,4	280 - 490
	3,2	270 - 580
Aço inox austenítico	0,8	60 - 180
	1,0	80 - 200
	1,2	90 - 260
	1,6	170 - 320
	2,4	250 - 450
Alumínio	0,8	70 - 150
	1,2	80 - 200
	1,6	120 - 300
	2,4	180 - 350
Cobre	0,8	70 - 170
	1,2	90 - 250
	1,6	150 - 400

Fonte: <<http://www.infosolda.com.br/images/imagens-artigos/Processos/gmaw/gmaw9.jpg>>. Acesso em: 16 maio 2018.

Figura 2.29 | Amperagem versus velocidade de alimentação do consumível



Fonte: <<http://www.infosolda.com.br/images/imagens-artigos/Processos/gmaw/gmaw1.jpg>>. Acesso em: 16 maio 2018.

Resolução da situação-problema

Considerando a Tabela 2.4, para $I = 200$ A, a melhor faixa de corrente é a de 190 – 360 A, o que nos levaria a selecionar o eletrodo de 1,60 mm de diâmetro para soldar o aço carbono de baixa liga.

Considerando o gráfico da Figura 2.29 que relaciona intensidade de corrente versus velocidade de alimentação, também chegaríamos ao arame de diâmetro 1,60 mm para $I = 200$ A.

Note, no entanto, que de acordo com o gráfico da Figura 2.29, seria possível também selecionar um arame de diâmetro 1,20 e 0,90 mm, o que implicaria em uma maior velocidade de alimentação (m/min).

Comparando com a Tabela 2.2, no intervalo de 90 – 220 A caberia escolher também, opcionalmente, o eletrodo de 1,00 mm, operando com a corrente próxima do limite superior (220 A) para esse eletrodo.

Conclui-se, portanto, que o eletrodo ou o arame de diâmetro 1,60 mm seria o mais indicado para a solda do aço carbono de baixa liga.

Faça valer a pena

1. Nos processos de soldagem, destacamos três importantes equipamentos: os transformadores, os retificadores e os geradores.

Os _____ são máquinas rotativas, os _____ permitem a passagem de corrente em um único sentido e os _____ são usados em grandes equipamentos de soldagem.

Marque a alternativa que contém o termo que preenche corretamente o segundo parágrafo do texto-base.

- a) transformadores – geradores – retificadores.
- b) geradores – retificadores – transformadores.
- c) retificadores – transformadores – geradores.
- d) geradores – transformadores – retificadores.
- e) transformadores – retificadores – geradores.

2. Na soldagem a arco elétrico, um dos elementos fundamentais desse processo são os chamados consumíveis. Entre os consumíveis de soldagem temos os seguintes:

- I) Arame.
- II) Varetas.
- III) Eletrodo.
- IV) Fluxo.

Considere as seguintes características dos consumíveis de soldagem:

- A) São pequenas hastes cilíndricas metálicas, revestidas ou não (nus), muito usadas em solda TIG.
- B) Sua função principal é a de proteger o cordão de solda de eventuais contaminações e oxidações formando uma “capa” protetora.
- C) É bobinado, podendo ser sólido ou tubular, revestido ou nu.
- D) Pode ser nu ou revestido (mais comum), pode ser sólido ou tubular, a alma desse consumível é metálica e condutora de eletricidade e está revestida por uma resina.

Marque a alternativa que contém a associação correta entre os consumíveis relacionados de I a IV com suas correspondentes características relacionadas de A até D.

- a) I-C; II-A; III-B; IV-D.
- b) I-A; II-D; III-C; IV-B.
- c) I-B; II-A; III-D; IV-C.
- d) I-C; II-A; III-D; IV-B.
- e) I-D; II-B; III-A; IV-C.

3. Na realização de uma solda é necessário o conhecimento de uma série de variáveis que podem afetar o resultado e, conseqüentemente, a qualidade da solda final. Sendo assim, no que se refere à soldagem, considere as seguintes afirmativas:

I- Saber identificar a condição do material (encruado, temperado, cimentado ou submetido a tratamento térmico diverso) é um dos itens fundamentais em manutenção de soldagem;

II- Produzir saídas de corrente e tensão nos valores desejados e com características adequadas é um dos requisitos para fontes de energia em soldagem;

III- A existência de carbono (C) na composição do eletrodo é importante porque diminui a resistência e a dureza da solda, facilitando a fusão do metal;

IV- Os gases utilizados na soldagem só servem para proporcionar uma melhor combustão e facilitar a fusão do metal de solda.

Com base na sequência de valores lógicos V e F das afirmativas anteriores, marque a alternativa que contém a ordem correta:

- a) V – V – F – V.
- b) F – F – V – V.
- c) V – F – V – F.
- d) F – V – V – F.
- e) V – V – F – F.

Referências

A.E.E. **Diagrama metaestável aço** (regra da alavanca). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JjjrY1_JIo>. Acesso em: 4 maio 2018.

CIMM. **Diagramas Fe-Fe₃C**. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6434-diagramas-fe-fesub3subc#.WuycyogvzIU>. Acesso em: 4 maio 2018.

ESAB. **Metalurgia da Soldagem**. 2005. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>>. Acesso em: 3 maio 2018.

_____. **Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW)**. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm>. Acesso em: 10 maio 2018.

_____. **Tratamento térmico de alívio de tensões em soldagem**. 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/tratamento_termico_alivio_tensoes_soldagem.cfm>. Acesso em: 26 abr. 2018.

FORTES, Cléber. **Apostila de Metalurgia da Soldagem**. ESAB, 2005. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

FTBS. **Aspectos Térmicos da Soldagem**. p.4-5. Disponível em: <http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/D7_T2_aspectos_termicos.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2018.

H Soldas. **Catálogo Geral**. Disponível em: <<http://hsoldas.com.br/site/pdf/CatalogoGeralHSoldas.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2018.

Inspecção de Equipamentos. **Estudo de caso**. Disponível em: <<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014/05/>>. Acesso em: 4 maio 2018.

KIMINAMI, Cláudio S. et all. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

LERMEN, Richard T; MACHADO, Ivan G. Nova tocha de plasma híbrida para processamento de materiais. **Soldagem & Inspeção**, v.17. n. 4. São Paulo.Oct./Dec. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242012000400006>. Acesso em: 10 maio 2018.

MODENESI, Paulo J. **Fluxo de calor em soldagem**. Disponível em: <<ftp://mecserv02.mecanica.ufu.br/LIVRE/VALTAIR%20-%20METALURGIA/MetSol03.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

_____. **Fontes de energia para soldagem a arco**. DEMET-UFMG, 2009. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fontes.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2018.

_____. **Terminologia usual de soldagem e símbolos de soldagem**. DEMET-UFMG, 2008. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/terminologia.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2018.

PAREDES, Ramón S.C. **Defeitos em soldagem**. DEMEC-UFPR. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Defeitos%20em%20soldagem.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2018.

PAREDES, Ramón S.C. **Defeitos em soldagem**. DEMEC-UFPR (s/d). Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Defeitos%20em%20soldagem.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2018.

PAULI, Evandro A. de; ULIANA, Fernando S. **Noções básicas de Processos de Soldagem e Corte** - Mecânica. SENAI-ES e CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão. 1996. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/arquivos/73/73.pdf>>. Acesso em: 11 maio 2018.

PIVETA, Ana Cláudia G. et all. Análise metalográfica do titânio puro submetido à soldagem laser Nd:YAG e TIG. **Rev. odontol. UNESP** v. 42. n. 1. Araraquara. Jan./Feb. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1807-25772013000100001>. Acesso em: 18 maio 2018.

PRINCIPO.ORG. Disponível em: <<http://principo.org/definico-de-soldagem.html?page=3>>. Acesso em: 18 maio 2018.

RITONI, Márcio et all. Efeito do tratamento térmico na estrutura e nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável superaustenítico. **Rev. Esc. Minas**. v. 60 n. 1. Ouro Preto Jan./Mar. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672007000100024&script=sci_arttext>. Acesso em: 6 maio 2018.

SCHWEDERSKY, Mateus B. et all. Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. **Soldagem & Inspeção**, v. 16. n. 4. São Paulo. Oct./Dec. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242011000400004>. Acesso em: 22 maio 2018.

SOEIRO Jr., Jaime C. et all. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. **Soldagem & Inspeção**. v.18 n. 2. São Paulo Apr./June 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242013000200011>. Acesso em: 6 maio 2018.

SOLIDWORKS. **Soldagem** – cordões de solda de filete. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2011/portuguese-brazilian/solidworks/sldworks/legacyhelp/sldworks/Weldments/HIDD_DVE_FEAT_WELD_BEAD.htm>. Acesso em: 4 maio 2018.

SERVSOLD. **Processos MIG-MAG**: parâmetros de soldagem. Disponível em: <http://www.servsolda.com.br/v/index.php?option=com_content&task=view&id=11&Itemid=13>. Acesso em: 16 maio 2018.

SILVA, Cláudio L.J da.; PARANHOS, Ronaldo. **Fissuração pelo hidrogênio “trincas a frio”**. Infosolda, 2003. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Trinca%20a%20frio.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

URTADO, Edson; GIMENES Jr, Luís. **TT de alívio de tensões após soldagem**. Industrial Heating, Dez, 2017. Disponível em: <<https://www.industrialheating.com/articles/93963-tt-de-al%C3%ADvio-de-tens%C3%B5es-ap%C3%B3s-soldagem>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem** – Processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015.

ZEEMANN, Annelise. **Tensões residuais de soldagem**. Infosolda, 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metall/tenses-residuais-na-soldagem.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

Processos convencionais de soldagem

Convite ao estudo

Caro aluno, bem-vindo à terceira unidade de ensino da disciplina de Manufatura Mecânica: Soldagem.

Nesta unidade, você conhecerá os processos convencionais de soldagem, em uma abordagem prática e teórica de grande importância para a sua formação.

Em nossa rotina, a soldagem convencional está presente em diversas situações, profissionais ou não. Na rotina profissional, caso você trabalhe no chamado “chão de fábrica” em uma indústria, a soldagem convencional tem um setor específico lá instalado; na rotina fora do ambiente profissional, é comum nos depararmos com necessidades de consertar peças ou produtos que exijam o uso de solda convencional (veja, por exemplo, um portão de grades que precisa de reparo, pois algumas peças dele estão oxidadas ou soltas – a solda é aplicada nesse tipo de reparo).

Ao final deste estudo, você será capaz de reconhecer os tipos, os processos, os parâmetros e as tecnologias utilizadas na soldagem convencional. Para tanto, você conhecerá e saberá aplicar os parâmetros dos processos de soldagem: a arco submerso e soldagem e corte a gás, soldagem com eletrodo revestido e os processos de soldagem MIG (Metal Inert Gas)/MAG (Metal Active Gas) e TIG (Tungsten Inert Gas).

Você terá aulas práticas nas quais conhecerá os processos de soldagem convencional e verá a importância dos tratamentos térmicos em soldagem e sua influência na microestrutura da solda.

Você será apresentado a desafios interessantes, pois a coordenação do seu curso decidiu desenvolver um projeto do carro de competição da categoria Baja SAE (Society of Automotive Engineers ou, traduzindo, Sociedade de Engenheiros Automotivos) e, sendo um entusiasta por competições automobilísticas, você fará parte da equipe. Assim, caberá a você o projeto da gaiola (estrutura tubular) do veículo, na qual a solda é de extrema importância nesse projeto.

Logo, você fará uso da sua criatividade para solucionar três situações-problema, a saber: (i) as normas da competição exigem que a gaiola deva ser fabricada a partir de tubos de aço carbono SAE 1020 e você, como membro da equipe responsável pela soldagem, deverá escolher o melhor processo de soldagem e apresentar as devidas justificativas à equipe; (ii) na segunda etapa, caberá a você especificar (selecionar) quais são os parâmetros de soldagem para o soldador; (iii) na última fase, deverá propor qual tratamento térmico é o mais adequado para a solda da gaiola.

Você já se imaginou em um ambiente de competição, em que a busca de solução e de resultados positivos são imediatos? Como você idealiza a realização de soldas em um ambiente de competição no qual seu equipamento deve ser flexível e não pode falhar na hora de ser operado?

Assim, ao longo dessa unidade, estudaremos os seguintes conteúdos indispensáveis para sua formação acadêmica e profissional: soldagem a arco elétrico MIG/MAG, TIG, com eletrodo revestido (SWAW), com arame tubular (FCAW), soldagem e corte oxiacetilênica, soldagem a arco submerso, automatização da soldagem e processos associados a tratamentos térmicos e análise de micro e macroestruturas de soldas.

Portanto, dedique-se bastante aos estudos e bom aprendizado!

Seção 3.1

Processos de soldagem convencional

Diálogo aberto

Nesta seção você estudará e aplicará conteúdos relacionados à soldagem convencional, envolvendo soldagem a arco elétrico MIG/MAG, soldagem a arco elétrico TIG, soldagem com eletrodo revestido (SWAW) e soldagem com arame tubular (FCAW). Esses conteúdos são de relevância extrema no estudo de soldagem.

O referido universo de técnicas de soldagem faz parte do nosso mundo em diversas situações: muitos desses processos são utilizados pela indústria automobilística, seja na fabricação de peças ou na produção da carroceria do veículo. Temos que uma solda realizada de forma inadequada pode acarretar enormes prejuízos, tanto para a indústria (que em diversas situações é obrigada a fazer recalls), como para o usuário do produto, que fica sujeito a acidentes inesperados.

Para contextualizar os assuntos dessa seção, imagine que você faz parte de uma equipe de competição universitária da categoria Baja SAE, a qual está na fase de dimensionar a estrutura tubular do carro, chamada de gaiola, conforme mostra a Figura 3.1. De acordo com as normas da competição, a gaiola deve ser fabricada a partir de tubos de aço carbono SAE 1020. A soldagem dos tubos, para formar a estrutura da gaiola, pode ser realizada por solda MIG/MAG ou fazer a solda com eletrodo revestido (SMAW) ou solda TIG. Caberá a você, como membro da equipe responsável pela soldagem, escolher o melhor processo e apresentar as devidas justificativas à equipe.

Figura 3.1 | Gaiola tubular do Baja



Fonte: <<https://goo.gl/8mgxFv>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

Também caberá a você indicar dois outros tipos de aços ou ligas não ferrosas para usar na estrutura da gaiola, mantendo as três possibilidades de solda: MIG/MAG, solda com eletrodo consumível (FCAW) ou não consumível (TIG).

Você acha que existe a possibilidade de realizar a solda dos tubos da gaiola usando outro processo, além daquele que selecionou? Se sim, teria a mesma efetividade? Se não, qual a sua justificativa? Ao concluir sua tarefa, você deverá apresentar seus resultados a toda a equipe para avaliação. Esses resultados serão apresentados na forma de uma planilha detalhada.

Note que, para solucionar essa problematização, todo o conteúdo a ser estudado nesta seção (soldagem a arco elétrico MIG/MAG, TIG, eletrodo revestido e arame tubular) é de grande importância, tanto para seu desempenho acadêmico como, futuramente, profissional.

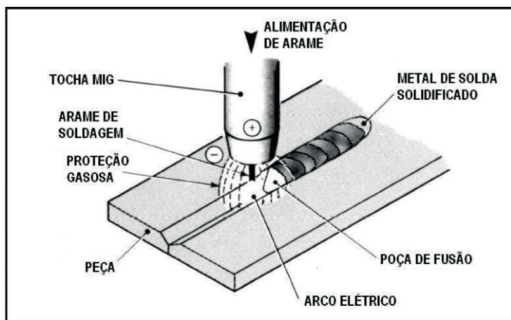
Bons estudos!

Não pode faltar

Soldagem a arco elétrico MIG/MAG

Um dos processos de soldagem por fusão a arco elétrico mais utilizado nas indústrias metalúrgicas e mecânicas é a solda MIG/MAG que significa Metal Inert Gas (MIG) e Metal Active Gas (MAG), ou ainda, soldagem a arco com proteção a gás inerte, que significa Gas Metal Arc Welding (GMAW)) e soldagem a arco com proteção por gás ativo (MAG). Todas essas nomenclaturas e siglas referem-se ao mesmo processo! A Figura 3.2 ilustra este modelo de soldagem.

Figura 3.2 | Soldagem a arco elétrico MIG/MAG



Fonte: <<https://goo.gl/CWH9w7>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

Nesse tipo de soldagem forma-se um arco elétrico entre a peça e o consumível, geralmente um arame, que se funde continuamente e é depositado na poça de fusão. O gás utilizado nessa solda MIG/MAG, que pode ser puro ou uma mistura, tem a função de proteger o metal de solda contra a ação da atmosfera (que pode agir e contaminar o cordão de solda).

Quando o gás de proteção é do tipo inerte, pode-se optar por Hélio, Argônio ou uma mistura dos dois; quando o gás de proteção é ativo, usa-se, em geral, CO_2 ou uma mistura com O_2 .

O arco elétrico é formado pela ação de uma corrente contínua (CC), obedecendo à seguinte polaridade: arame (consumível) como polo positivo e a peça (metal base) como polo negativo. A intensidade da corrente pode ultrapassar os 600 A e a tensão (voltagem) pode variar entre 15 Volts e 32 Volts.

A solda MIG/MAG é muito versátil, tanto no que diz respeito à gama de materiais que podem ser soldados por ela, como também no que tange à forma de soldagem: manual, automatizada e em posições diversas. Entre os materiais de ótima soldabilidade pelo processo MIG/MAG, temos:

- Aços carbono comuns (estruturais).
- Aços inoxidáveis.
- Alumínio e suas ligas.
- Cobre e vários outros.

As vantagens do processo MIG/MAG, em comparação aos processos de soldagem com eletrodos revestidos, TIG e arco submerso, são as seguintes:

- a soldagem pode ser executada em todas as posições;
 - não há necessidade de remoção de escória;
 - alta taxa de deposição do metal de solda;
 - tempo total de execução de soldas de cerca da metade do tempo se comparado ao eletrodo revestido;
 - altas velocidades de soldagem; menor quantidade de distorção das peças;
 - largas aberturas preenchidas ou amanteigadas facilmente, tornando certos tipos de soldagem de reparo mais eficientes;
 - não há perdas de pontas como no eletrodo revestido.
- (FORTES, 2005b, p. 4)



As desvantagens desse processo são mínimas, porém devem ser consideradas:

- Exigência de foco e concentração durante a execução da solda (pois mesmo uma ação mundana de coçar a cabeça leva a resultados ruins).
- A solda MIG/MAG limita-se à soldagem de espessuras pequenas, pois em placas de espessura elevada a solda não apresenta boa penetração e não é recomendada.

Uma característica interessante desse processo é que a transferência de metal do arame para o metal base pode se dar por três processos distintos:

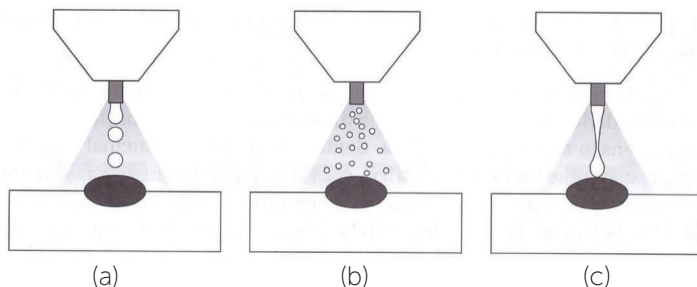
a) Curto-circuito (short arc): aqui, a transferência se realiza a partir de um curto-circuito elétrico, quando o metal fundido na ponta do arame toca a poça de fusão.

b) Globular: pode acontecer de as gotas de metal fundido serem muito grandes e, nesse caso, a gravidade tem um papel destacado, fazendo com que tais gotas se movam em direção à poça de fusão.

c) Aerossol (spray arc): quando as gotas de metal fundido são muito menores do que as globulares, estas são desprendidas da ponta do arame e projetadas por forças eletromagnéticas em direção à poça de fusão.

Na transferência globular e por spray a corrente e a tensão são elevadas a níveis muito superiores, quando comparados aos do método por curto-circuito. A Figura 3.3, a seguir, mostra-nos como são essas três formas de transferências.

Figura 3.3 | Métodos de transferência metálica em um arco elétrico: (a) globular; (b) spray; (c) curto-circuito



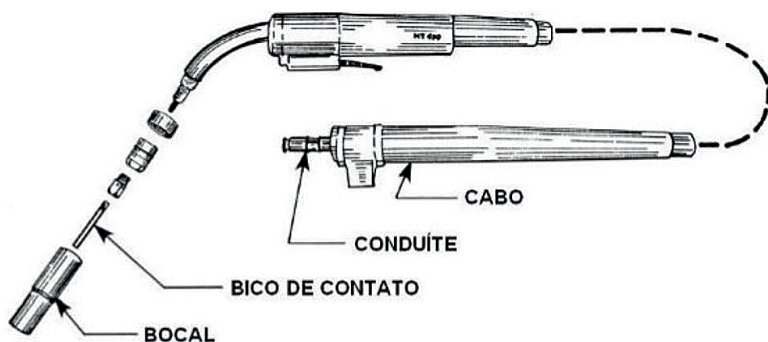
Fonte: Kiminami et al. (2013, p. 139).

A forma de transferência do metal do arame para a poça de fusão depende das seguintes variáveis:

- Corrente de soldagem.
- Diâmetro do arame.
- Comprimento do arco (tensão).
- Características da fonte.
- Tipo de gás de proteção.

Um item importante do equipamento de solda MIG/MAG é o dispositivo que gera a tocha para fundir o arame. Vale acrescentar aqui que as soldas dessa classe são realizadas a partir de fontes que operam com polaridade reversa (o polo positivo é conectado à tocha e o negativo, à peça). O alimentador de arame (acionado por um motor) é outro dispositivo importante do conjunto que forma o equipamento de soldagem. A Figura 3.4, a seguir, dá detalhes desse dispositivo.

Figura 3.4 | Dispositivo de tocha para solda MIG/MAG



Fonte: adaptado de: <<https://goo.gl/hmRxHs>> - Acesso em: 27 jul. 2018.



Pesquise mais

As características da soldagem MIG/MAG são extensas e exigem um estudo mais aprofundado. Para tanto, procure ampliar seus conhecimentos sobre essa modalidade de soldagem no Capítulo 2, do material indicado a seguir:

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015. p. 99-124.

Bons estudos e boa pesquisa!

Soldagem a arco elétrico TIG

Um processo de soldagem muito comum é o TIG (*Tungsten Inert Gas*), que é o processo de soldagem a gás inerte com eletrodo de tungstênio, ou ainda GTAW (*Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*), ou seja, soldagem a arco elétrico com gás de proteção e eletrodo de tungstênio.

Ao contrário da solda MIG/MAG, na qual o eletrodo é consumido, na soldagem TIG o eletrodo é não consumível, sua função básica é a de conduzir a corrente para formar o arco de solda e gerar a poça de fusão no metal base. Como o eletrodo não se desgasta (não é consumido), não ocorre a formação de escória e a solda resultante é de ótima qualidade e sem haver necessidade de limpeza ao final do processo. A proteção gasosa é feita por um gás inerte puro ou pela mistura de dois gases.

Há, ainda, o caso de soldagem com TIG em que o eletrodo de tungstênio é o responsável pela condução de corrente e, adicionalmente, usa-se um eletrodo de preenchimento que, junto com o metal base, funde-se formando o cordão de solda.

A solda TIG é indicada para soldagem de ligas de alumínio e aços inoxidáveis. É muito aplicada na indústria nuclear, aeronáutica, química e de alimentos. Ela pode ainda ser aplicada na soldagem de aços carbono de baixa liga, ligas de magnésio, níquel e cobre.

Considerando que o eletrodo utilizado no processo TIG não é consumido, mas transporta corrente elétrica que o eleva a altas temperaturas, é necessário que esse eletrodo tenha propriedades termiônicas, ou seja, deve alcançar temperaturas suficientemente altas para causar a emissão de elétrons por agitação térmica sem que seja consumido.

O equipamento básico para soldagem TIG é composto dos seguintes dispositivos: fonte de energia, unidade de alta frequência, gás de proteção, bocal de gás e eletrodo.

Na soldagem TIG, pode ser usada tanto a corrente contínua (CC) como a corrente alternada (AC). O Quadro 3.1, a seguir, mostra as características da soldagem TIG com esses dois tipos de corrente.

Quadro 3.1 | Características das correntes CC e AC na soldagem TIG

Tipo de corrente:	Contínua		Alternada
Característica:	Direta CC-	Inversa CC+	CA
Objetivo:	Penetração profunda e preservação do tungstênio.	Penetração "rasa" e efeito limpeza de óxido superficial.	Preservação do W e efeito limpeza a cada ciclo.
Aplicação:	Aço carbono, baixa/alta liga, inoxidáveis, prata e cobre e ligas, revestimento.	Viável para soldagem de pequenas espessuras.	Alumínio, magnésio e suas ligas
Eletrodo de W: capacidade de suportar corrente sem fundir:	Ótima, pode usar altos valores de corrente.	Pobre, somente para valores baixos de corrente	Boa, pode-se usar valores intermediários de corrente.
Ação de limpeza do óxido na soldagem de Al e Mg e suas ligas:	Não.	Sim.	Sim, a cada meio ciclo.
Balanço de calor no arco (aprox.):	70% na peça. 30% no eletrodo.	70% na peça. 30% no eletrodo.	50% na peça. 50% no eletrodo.
Fluxo de elétrons: penetração:	Da ponta do eletrodo para a poça de fusão.	Da poça de fusão para a ponta do eletrodo.	Da ponta do eletrodo para a poça de fusão e vice-versa

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/7tNi9n>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

Listamos, a seguir, as principais vantagens e desvantagens da soldagem TIG:

Vantagens:

- Elevado controle da poça de fusão;
- Ótimo acabamento;
- Ótima qualidade das propriedades mecânicas;
- Não apresenta escória, respingos ou fumos de soldagem;
- Possibilidade de soldagem de chapas muito finas;
- Soldagem de inúmeras ligas metálicas (aço, níquel, inoxidáveis,



titânio, alumínio, magnésio, cobre, bronze e até mesmo ouro);

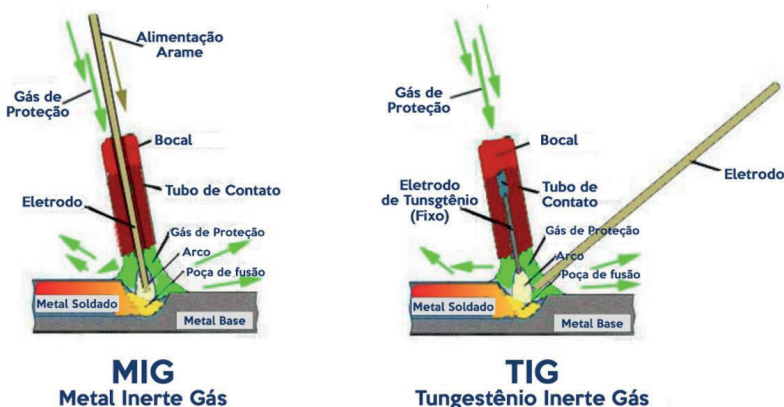
- Processo que visa a estanqueidade;
- Em determinadas espessuras e preparações não necessita de material de adição.

[Desvantagens, ou] Limitações:

- Baixas taxas de deposição;
- Necessidade de maior coordenação e experiência do soldador no controle da poça de fusão;
- Dificuldade de manter proteção adequada em ambientes com vento;
- Baixa tolerância a contaminantes. (ESAB, [s.d.], [s.p.])

Observe a Figura 3.5, que ilustra como funciona a solda TIG e mostra a grande diferença entre ela e a solda MIG/MAG.

Figura 3.5 | Solda MIG e solda TIG

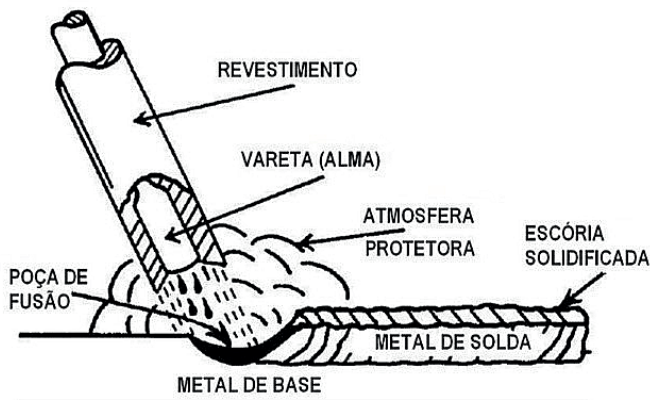


Fonte: <<https://goo.gl/hwYm2E>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Soldagem com eletrodo revestido (SMAW)

Uma das modalidades de solda mais utilizadas nos diversos setores produtivos é a soldagem com eletrodo revestido. Trata-se de um processo com arco elétrico e sua denominação advém da sigla em inglês SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*, ou seja, soldagem a arco elétrico com eletrodo (metálico) revestido. Veja a Figura 3.6, que nos mostra como funciona esse importante processo de soldagem.

Figura 3.6 | Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido



Fonte: <<https://goo.gl/bxkTkK>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Após a fusão, o revestimento do eletrodo forma uma escória líquida na superfície da poça de fusão, exercendo a função de proteção contra contaminação do cordão de solda. Após solidificação e resfriamento, a camada protetora é removida por meio de um martelo e talhadeira.

Os eletrodos revestidos são produzidos de tal forma que são constituídos de uma região central (núcleo ou alma) e uma camada superficial, que compõe o revestimento. A alma do eletrodo é, geralmente, de aço carbono, e o revestimento pode ser composto de diversos materiais (ingredientes), líquidos (silicato de sódio ou silicato de potássio) ou sólidos (pós ou materiais granulados, tais como rutilo, celulose e sílica, dentre outros). Tem-se que a corrente elétrica flui pela alma do eletrodo.

As principais funções dos revestimentos são:

- Proteger o metal de solda.
- Estabilizar o arco.
- Promover a adição de elementos de liga ao metal de solda.
- Auxiliar no direcionamento do arco.
- Controlar a integridade do metal de solda.
- Proporcionar melhorias nas propriedades mecânicas do metal de solda.
- Promover a proteção da alma do eletrodo.



Há dois tipos importantes de eletrodos: os eletrodos consumíveis (que se desgastam com o uso, pois se fundem), utilizados na soldagem MIG/MAG; e os eletrodos sólidos (não revestidos) a base de tungstênio, que não se desgastam durante a soldagem (não sofrem fusão) e são utilizados na soldagem TIG.

A soldagem com eletrodos revestidos é amplamente aplicada na montagem de diversos equipamentos e estruturas, seja em oficinas seja em atividades externas de manutenção. Trata-se de uma solda flexível e possível de ser utilizada em materiais de espessuras entre 1,5 mm a 30 mm e em qualquer posição (INFOSOLDA, [1997b?]).

É, predominantemente, um processo manual muito utilizado na fabricação de embarcações (estaleiros). Com esse método, é possível soldar aço-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, alumínio, cobre, níquel e ligas desses materiais. A Tabela 3.1, a seguir, apresenta uma mostra para alguns eletrodos (os mais utilizados), de como selecionar a amperagem em função da bitola (diâmetro) do eletrodo.

O equipamento utilizado para a realização da soldagem com eletrodo revestido é bastante simples, pois consiste, basicamente, em uma fonte de energia, um porta-eletrodo, cabos de solda (flexíveis) e conectores. Pelo fato de o revestimento do eletrodo formar uma capa de escória, recomenda-se usar também ferramentas de limpeza, tais como: picadeira, escova de aço, lixadeira ou escova rotativa.

Tabela 3.1 | Amperagem em função da bitola (diâmetro) do eletrodo para soldagem com eletrodo revestido

Bitola (mm)	Tipo de eletrodo e faixa de amperagem		
	6010	6013	7018
2,5	60 – 80	60 – 100	65 – 105
3,25	80 – 140	80 – 140	110 – 150
4,0	110 – 180	120 – 205	140 – 195

Fonte: adaptada de <<https://www.youtube.com/watch?v=uM8m001axhQ>>. Acesso em: 26 jul. 2018.



Alguns fabricantes de equipamentos de solda fornecem calculadoras para cálculo de corrente de soldagem e espessura de chapa a ser soldada, para o caso de eletrodo revestido (SMAW) e solda MIG/MAG. É possível fazer o download de uma dessas calculadoras em seu celular, por meio do link a seguir:

BOXER SOLDAS. **Calculadoras para solda**. Disponível em: <<https://goo.gl/Qd8Ddc>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Após fazer o download da calculadora, obtenha os valores de corrente e espessura da chapa para soldagem com eletrodo revestido do tipo 7018 (vide Tabela 3.1), para uma bitola de 4,0 mm. Compare os resultados da tabela com os da calculadora.

Solução:

Da Tabela 3.1, para eletrodo 7018 de bitola 4,0 mm, a amperagem pode variar de 140 A a 195 A.

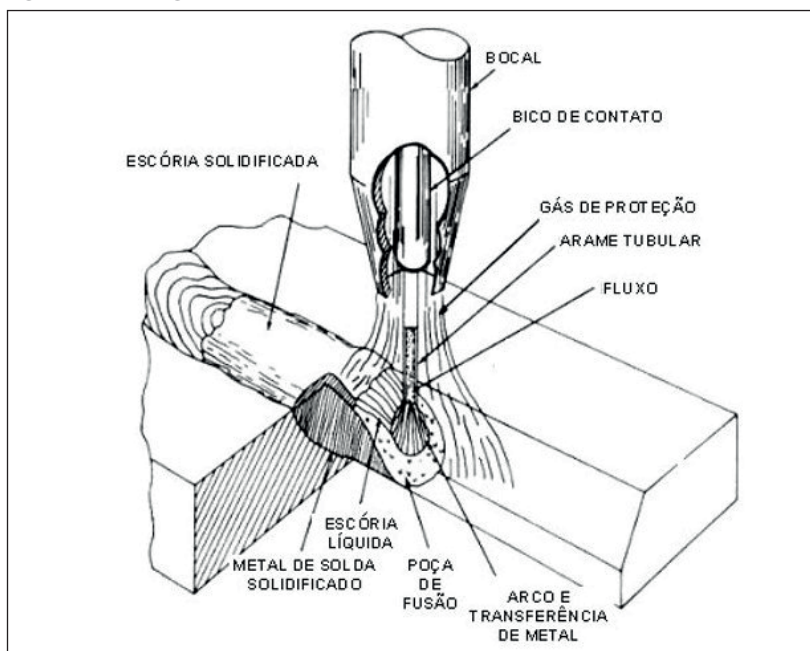
Da calculadora de soldagem, a corrente pode variar de 150 A a 220 A, CC, para soldar chapa de 4,00 mm a 5,00 mm de espessura.

Note, nesse exemplo, que a internet oferece ferramentas úteis e rápidas para se especificar alguns parâmetros de soldagem importantes, que são fáceis de se usar.

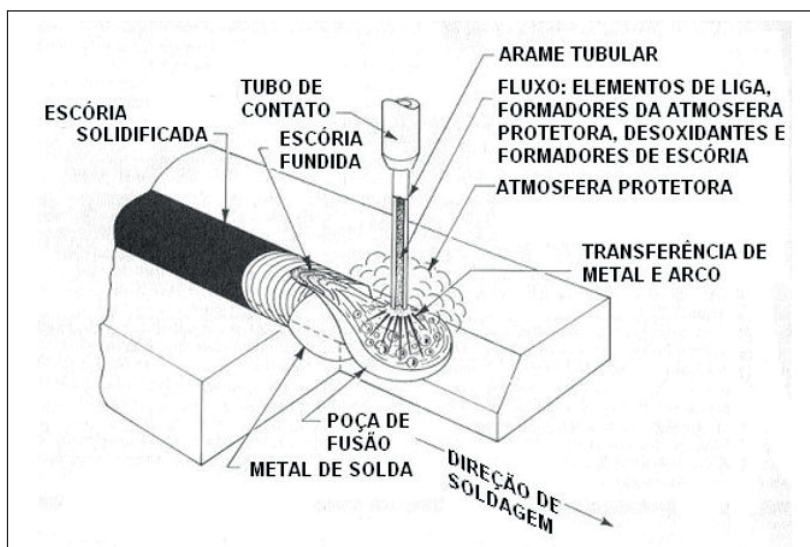
Soldagem com arame tubular (FCAW)

A soldagem com arame tubular (FCAW – Flux-Cored Arc Welding) é similar à soldagem MIG/MAG com eletrodo revestido, sendo que a diferença básica reside na capacidade de produtividade, características de soldagem e integridade do metal de solda. A soldagem com arame tubular pode ser de dois tipos: (a) com gás de proteção; e (b) autoprottegida. As Figuras 3.7(a) e 3.7(b) mostram esses dois casos.

Figura 3.7 | Soldagem com arame tubular



(a) Soldagem com arame tubular com gás de proteção



(b) Soldagem com arame tubular autoprotetida

Fonte: <<https://goo.gl/x9BpH9>>. Acesso em: 26 jul. 2018.



Na soldagem com arame tubular, o fluxo escoia internamente ao eletrodo através de um canal (tubo), enquanto na soldagem com eletrodo revestido o fluxo é externo e “protege” o núcleo interno do eletrodo (a alma). Você conseguiria visualizar alguma diferença adicional entre esses dois tipos de eletrodos?

Para se ter uma ideia da intensidade da amperagem utilizada nesse tipo de soldagem, a intensidade de corrente é diretamente proporcional à velocidade de alimentação do arame de solda. Desde que os parâmetros de soldagem (tensão do arco elétrico, “stick-out”, velocidade de soldagem, taxa de deposição e vazão do gás auxiliar de proteção) permaneçam constantes, a variação da intensidade de corrente influencia outros fatores de soldagem; por outro lado, o aumento da intensidade da amperagem implica aumento da taxa de deposição, maior penetração e cordões de solda irregulares; porém, se usarmos baixa amperagem, podemos causar salpicos em demasia, gotas de grande diâmetro e propiciar a ocorrência de porosidades.

Vale explicar aqui o “stick-out”, que é a distância entre a ponta do eletrodo e o bico de contato. “Quanto maior for o “stick-out”, maior será o calor desenvolvido por efeito Joule, o que vai influenciar a fusão do consumível e o aquecimento do fluxo interno do eletrodo” (INFOSOLDA, [1997a?]).

Na soldagem com arame tubular, o controle dos parâmetros de soldagem é fundamental para se obter ótimos resultados na solda. Os parâmetros de soldagem a serem controlados são os seguintes: corrente, tensão, extensão do eletrodo, vazão do gás de proteção e a velocidade de soldagem.

De acordo com o Portal Metálica ([s.d.], [s.p.]), podemos citar os seguintes metais base soldáveis pelo processo FCAW:

- Aços baixo carbono.
- Aços estruturais resistentes à corrosão atmosférica.
- Aços cromo-molibdênio resistentes a altas temperaturas.
- Aços temperados.
- Aços médio carbono, tratados termicamente e baixa liga.
- Aços inoxidáveis.
- Ligas de níquel.



A AWS estabeleceu as seguintes especificações para os consumíveis para soldagem FCAW:

- A5.20 – Para eletrodo de aço carbono.
- A5.22 – Para eletrodo de aço inoxidável.
- A5.29 – Para eletrodo de aço de baixa liga.

O A5.22 é indicado para a soldagem FCAW e varetas de aço inoxidável revestidas com fluxo para soldagem TIG.



Pesquise mais

A soldagem FCAW é uma das mais utilizadas na indústria petrolífera. Você pode pesquisar sobre esse processo conhecendo mais sobre os equipamentos, gás e sobre as vantagens e desvantagens a partir do *Centro de Conhecimento ESAB*, indicado a seguir

ESAB. Centro de Conhecimento ESAB. **Processos de soldagem:** arames tubulares. Disponível em: <<https://goo.gl/Dw6aC9>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

Boa pesquisa!

Sem medo de errar

Caro aluno, lembrando a situação apresentada no início da seção, você está participando de um desafio proporcionado pela coordenação do seu curso, do qual muitos alunos gostariam de participar (há uma concorrência pela vaga), que é a de ser integrante de uma equipe de Baja SAE e disputar a competição com times de outras faculdades.

Na sua equipe, você é o responsável pelo projeto e construção da gaiola do carro. Segundo as regras do organizador da competição, a gaiola básica deve ser de aço carbono comum SAE 1020. Você deverá selecionar o melhor processo de soldagem dos tubos de aço (a gaiola é construída de tubos de aço). Suas opções são as seguintes: (a) MIG/MAG; (b) solda com eletrodo revestido (SMAW); e (c) TIG. Qual selecionar? Vejamos cada uma delas.

Antes, porém, embora a seleção do processo de soldagem dependa muito da experiência do soldador/projetista, na equipe Baja o que conta é a curiosidade, a criatividade, a capacidade de raciocínio crítico e a liderança de equipe, sendo que você deverá despertar e desenvolver ao máximo todas essas habilidade/atitudes. Vamos em frente.

A soldagem MIG/MAG vai exigir a disponibilidade de um gás de proteção (inerte ou ativo, puro ou misturado) que pode ser Hélio ou Argônio (inertes) ou CO_2 (ativo) e O_2 . Essa solda trabalha com consumível do tipo arame. Sua fonte de corrente deve ser do tipo CC e, por se tratar de um equipamento para serviços manuais, a corrente máxima não deve ultrapassar os 90 A. Deve-se ter um equipamento de fácil transporte.

Os aços carbono estão entre os materiais possíveis de serem soldados pela MIG/MAG.

Há de se considerar que a solda MIG/MAG limita-se a espessuras pequenas, pois em placas de espessura elevada a solda não apresenta boa penetração e não é recomendada. No caso de solda de tubos, há de se verificar a espessura do tubo para ter certeza de que a MIG/MAG oferecerá penetração suficiente.

Uma possível limitação da utilização do processo MIG/MAG é o fato de se tratar de uma solda rápida, porém difícil de ser regulada e é indicada para processos de elevada produção repetitiva.

Na soldagem com TIG também haverá a exigência de ter disponível um torpedo de gás inerte (Hélio ou Argônio) e eletrodo de tungstênio (não consumível) para fundir uma vareta de preenchimento de aço carbono à junta de solda. Essa solda é muito usada para soldar ligas de alumínio e aços inoxidáveis, embora consiga também soldar aço carbono comum. É uma solda “mais limpa”. Além disso, o porte do equipamento de soldagem é um pouco menor do que o da MIG/MAG e mais fácil de transportar. A amperagem a ser utilizada também deve ter um limite de cerca de 90 A.

A TIG opera tanto em CC como CA, sendo que a CC é a mais indicada para aço carbono, conforme mostra o Quadro 3.1 a seguir.

Quadro 3.1 | Características das correntes CC e AC na soldagem TIG

Tipo de corrente:	Contínua		Alternada
Característica:	Direta CC-	Inversa CC+	CA
Objetivo:	Penetração profunda e preservação do tungstênio.	Penetração “rasa” e efeito limpeza de óxido superficial.	Preservação do W e efeito limpeza a cada ciclo.
Aplicação:	Aço carbono, baixa/alta liga, inoxidáveis, prata e cobre e ligas, revestimento.	Viável para soldagem de pequenas espessuras.	Alumínio, magnésio e suas ligas
Eletrodo de W: capacidade de suportar corrente sem fundir:	Ótima, pode usar altos valores de corrente.	Pobre, somente para valores baixos de corrente	Boa, pode-se usar valores intermediários de corrente.
Ação de limpeza do óxido na soldagem de Al e Mg e suas ligas:	Não.	Sim.	Sim, a cada meio ciclo.
Balanço de calor no arco (aprox.):	70% na peça. 30% no eletrodo.	30% na peça. 70% no eletrodo.	50% na peça. 50% no eletrodo.
Fluxo de elétrons: penetração:	Da ponta do eletrodo para a poça de fusão.	Da poça de fusão para a ponta do eletrodo.	Da ponta do eletrodo para a poça de fusão e vice-versa

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/dzUkFC>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Por ser uma solda “mais limpa” e mais fácil de ser regulada, a TIG não é indicada para produção em larga escala, mas sim para trabalhos menores (digamos, mais “artesaniais”).

Na soldagem com eletrodo revestido (SMAW) não haverá a necessidade de se usar gás de proteção, pois o revestimento do eletrodo cumpre a função de proteger a solda (logo, tem-se um gasto a menos). Tal tipo de eletrodo gera uma camada de escória que precisará ser removida pós-soldagem. Trata-se de um processo que depende muito da habilidade do soldador (assim como o processo MIG/MAG). Sua aplicação em aços carbono é indicada, porém para espessuras de juntas superiores a 1,5 mm (indo até 30 mm).

Veja que não há uma única solução para essa problematização. Assim, você deverá indicar e discutir uma solução com sua equipe.

Quais seriam materiais alternativos ao aço SAE 1020?

Vale dizer aqui que a SAE recomenda o 1020, por ser um aço estrutural fácil de soldar por vários processos, por seu baixo custo e por ser fácil de encontrar no mercado. Porém, é possível utilizar outros materiais no projeto da gaiola do Baja. Pode-se usar alumínio (ou liga de alumínio) ou outro tipo de aço (médio carbono ou aço de baixa liga). Aqui, no entanto, o custo do material seria mais elevado se comparado ao aço carbono comum. Assim, sendo a primeira experiência da equipe com essa categoria de competição, o recomendável é utilizar o material indicado pelos organizadores da competição; no caso, o SAE 1020.

Você poderia agora se perguntar: além desses três tipos de soldagem (MIG/MAG, TIG e eletrodo revestido) haveria uma quarta opção? Sim, há a opção de se soldar com arame tubular, que é similar à solda MIG/MAG, mas o custo da solda seria mais elevado e teria a mesma efetividade que qualquer uma das outras três possibilidades.

Seu relatório final deverá ser apresentado à equipe e você deverá discutir com ela as possibilidades e, em conjunto com os colegas (veja a importância do trabalho em equipe) chegar a um parecer final.

Finalmente, veja que, para solucionar essa problematização, todos os conteúdos abordados nesta seção foram de extrema importância e aplicáveis na íntegra. Note, ainda, a importância do conhecimento desses conteúdos tanto para a sua vida acadêmica quanto para a sua vida profissional. Por isso a importância de sua dedicação aos estudos.

Avançando na prática

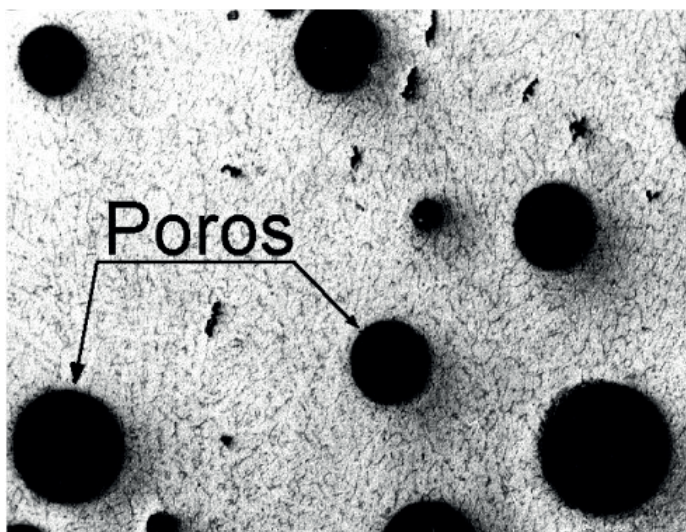
Eliminação de porosidade em soldagem MIG/MAG

Descrição da situação-problema

Trabalhando na soldagem de tubos de uma gaiola de carro “off road” com solda MIG/MAG, observou-se a ocorrência frequente de defeitos do tipo porosidade, similar ao apresentado na Figura 3.8

a seguir. Esse defeito, típico de ocorrer em soldagens MIG/MAG, comprometerá toda a qualidade da solda e, conseqüentemente, a segurança do piloto durante a prova. Caberá a você indicar as possíveis causas e propor soluções.

Figura 3.8 | Porosidade em solda



Fonte: <<https://goo.gl/Tqcoa7>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Resolução da situação-problema

Após fazer uma inspeção visual do defeito em questão e fazer uma pesquisa sobre as possíveis causas e soluções para corrigi-lo, você chegou ao seguinte parecer:

1. Avaliando as condições de limpeza e os aspectos superficiais dos tubos, notou-se a presença de porções oxidadas e regiões com sobras de pintura não removida previamente. Você concluiu que a presença desses contaminantes é a possível causa da ocorrência de porosidades; assim, recomenda-se uma limpeza prévia nos tubos, livres de qualquer contaminante, para evitar a ocorrência de porosidades. A limpeza pode ser realizada com uma esmerilhadeira ou uma lixa.

2. A solda MIG/MAG é dependente do controle do gás de proteção; um controle (pressão e vazão) inadequado poderá afetar a qualidade da solda e, em particular, gerar poros. Ter certeza de uma regulação adequada resultará em uma solda de boa qualidade, livre de porosidades.

Logo, com base nas análises (1) e (2) você emitirá um relatório técnico para a equipe de soldagem, a fim de solucionar a ocorrência de porosidades em solda MIG/MAG.

Faça valer a pena

1. Os processos de soldagem convencionais fazem usos rotineiros (comuns) de siglas internacionais (baseadas nas normas da AWS) para identificar os vários tipos de solda. É fundamental que um soldador profissional as conheça. Dentre elas, podemos citar: (i) SMAW; (ii) GTAW; (iii) FCAW; e (iv) GMAW.

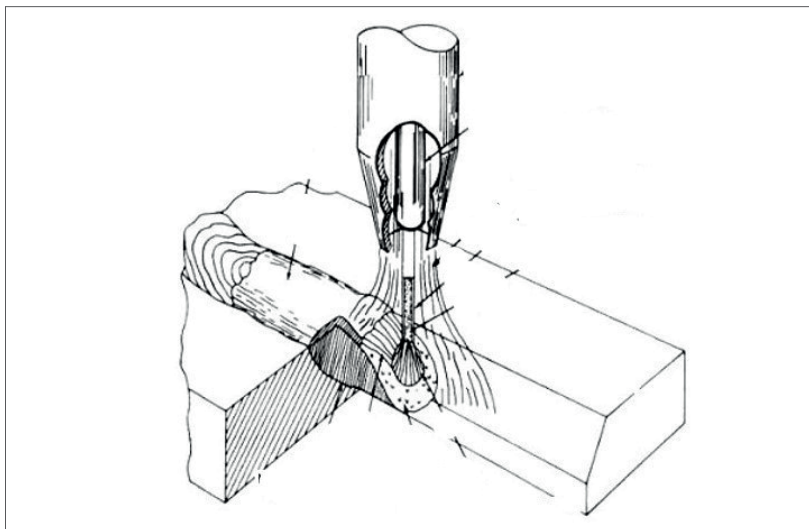
De acordo com o texto-base, assinale a alternativa que relaciona corretamente as siglas de (i) até (iv) com os respectivos processos de soldagem.

- a) Solda TIG – solda MIG/MAG – solda com arame tubular – solda com eletrodo revestido.
- b) Solda MIG/MAG – solda com eletrodo revestido – solda TIG – solda com arame tubular.
- c) Solda com eletrodo revestido – solda TIG – solda com arame tubular – solda MIG/MAG.
- d) Solda com arame tubular – solda TIG – solda com eletrodo revestido – solda MIG/MAG.
- e) Solda com eletrodo revestido – solda com arame tubular – solda MIG/MAG – solda TIG.

2. Observe a figura a seguir que ilustra uma vista em corte de uma solda sendo realizada.

A Figura 3.9 ilustra uma soldagem _____, por onde flui _____ formador de _____ e é realizada _____.

Figura 3.9 | Modelo de soldagem convencional



Assinale a alternativa que completa os termos a serem preenchidos nas lacunas, na ordem correta.

- a) com eletrodo revestido – a corrente – poça de fusão – com gás de proteção.
- b) com arame tubular – a corrente – fluxo – sem gás de proteção.
- c) eletrodo tubular – a corrente – arco elétrico – com gás de proteção.
- d) com arame tubular – o fluxo – escória – com gás de proteção.
- e) automatizada – o arame tubular – escória – manualmente.

3. Nas soldagens TIG e MIG/MAG há algumas diferenças que as tornam específicas para determinadas aplicações e situações.

Sendo assim, considere as seguintes afirmativas:

- () Na soldagem MIG/MAG, pode-se usar tanto corrente contínua (CC) como alternada (AC), ao passo que na TIG só é possível usar corrente contínua (CC).
- () Tanto na soldagem TIG como na MIG/MAG pode-se utilizar gás de proteção puro ou misturado em proporções adequadas.
- () O eletrodo da solda TIG não é considerado consumível, pois tem apenas a função de conduzir corrente elétrica para fundir o metal de solda e de adição.
- () A solda TIG, quando faz uso de CC, é indicada para soldagem de aço carbono, baixa/alta liga, inoxidáveis, prata e cobre e suas ligas.

Com base na sequência de valores lógicos V (verdadeiro) e F (falso), das afirmações anteriores, marque a alternativa que contém a ordem correta:

- a) F – V – V – V.
- b) V – F – F – V.
- c) F – V – F – V.
- d) V – F – F – F.
- e) F – F – V – V.

Seção 3.2

Tipos e parâmetros de soldagem convencional

Diálogo aberto

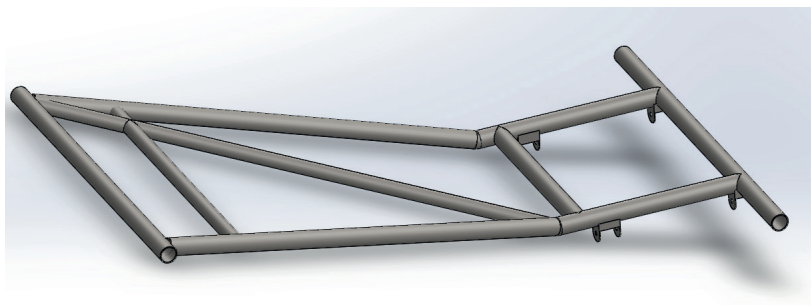
Caro aluno, bem-vindo à seção denominada Tipos e *parâmetros de soldagem convencional*, na qual você terá os seguintes conteúdos: soldagem oxiacetilênica, soldagem e corte a gás; seleção de parâmetros de soldagem; soldagem a arco submerso (SAW) e tipos de fluxo; e automatização de processos de soldagem. É interessante notar que você já deve ter se deparado, em alguma oficina mecânica, funilaria ou em uma serralheria, com um dos tipos de soldagem que abordaremos, a solda oxi-gás, pois ela é uma das soldas mais comuns.

Esses tópicos compõem um conjunto de conteúdos detalhados que lhe permitirão chegar à solução da problematização. Para tanto, você será instigado a externar seu raciocínio crítico e de resolução de problemas, sua curiosidade e criatividade. E, por se tratar de uma equipe Baja, também será importante seu espírito de liderança. Vamos ao nosso problema!

Lembre-se de que seu coordenador de curso criou uma equipe de Baja, da qual você faz parte e, ainda envolvido com o projeto de construção do carro Baja SAE (*Society of Automotive Engineers* ou, traduzindo, Sociedade de Engenheiros Automotivos), você determinou qual seria o processo de soldagem mais indicado para soldar os tubos de aço SAE 1020. Nesta segunda etapa do projeto, sempre fazendo uso da sua criatividade, caberá a você especificar (selecionar), em uma folha de registros de operação de solda, quais são os parâmetros de soldagem para o soldador, ou seja: amperagem, tipo de eletrodo, tipo de proteção, tipo de solda, posição de solda, etc. Nesse momento, você tem em mãos os seguintes dados sobre os tubos de parte da gaiola, que é mostrada na Figura 3.10:

- Material: tubos de aço SAE 1020.
- Dimensões: tubo de 1"1/4 x 2,65 (1 polegada e um quarto com parede de 2,65 mm).

Figura 3.10 | Desenho esquemático dos tubos da gaiola



Fonte: <<https://goo.gl/WfKN4T>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

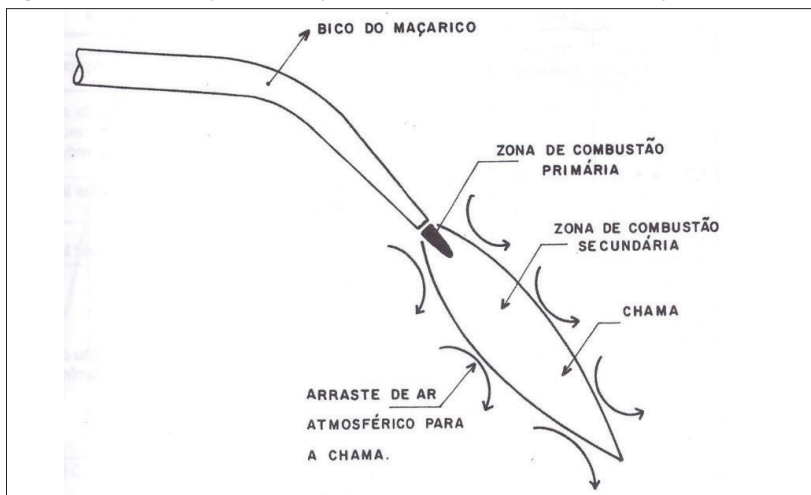
- O uso de solda por arco submerso seria recomendável para soldar esses tubos? Quais suas limitações? Ao final desta etapa, você deverá apresentar um relatório para os membros da equipe.
- Observe que, para solucionar de maneira adequada essa problematização, todo o conteúdo desta seção deverá ser aplicado, aliado sempre à sua criatividade.
- Bom trabalho!

Não pode faltar

Soldagem oxiacetilênica, soldagem e corte a gás

Você se lembra da associação americana de soldagem AWS (*American Welding Society* ou, traduzindo, Sociedade Americana de Soldagem)? Segundo essa entidade, a soldagem com gás, também denominada soldagem oxi-gás, consiste em um grupo de processos em que o coalescimento ou união (que é o fundente) ocorre devido ao aquecimento produzido por uma chama, usando ou não metal de adição, com ou sem aplicação de pressão (WAINER; BRANDI; MELLO, 2015, p. 180). Nesse processo, mostrado na Figura 3.11, a chama produzida pela queima dos gases pode alcançar temperaturas superiores a **3000 °C**. A forma mais comum de solda oxi-gás é a que envolve a utilização de uma combinação dos gases acetileno e oxigênio, que é a chamada de solda oxiacetilênica.

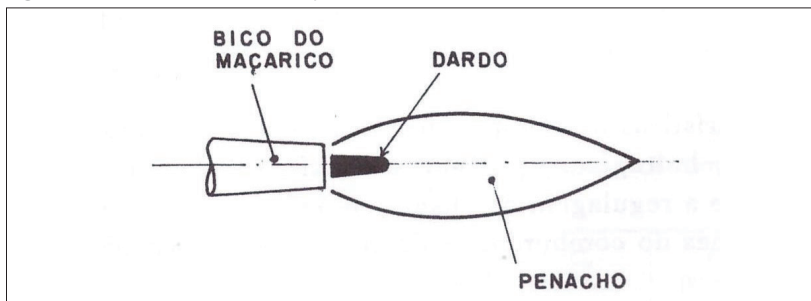
Figura 3.11 | Localização das reações de combustão no bico do maçarico



Fonte: adaptada de Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 181).

A Figura 3.12, a seguir, mostra as partes e as respectivas denominações da chama.

Figura 3.12 | Nomenclatura das partes da chama



Fonte: adaptada de Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 181).

No dardo ocorre uma combustão dita "primária" e no penacho ocorre a combustão secundária. Na solda oxi-gás, temos as seguintes possibilidades:

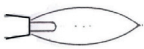
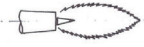
- Combustível: acetileno, hidrogênio, propano (ou GLP – Gás Liquefeito de Petróleo).
- Comburente: oxigênio.

A regulagem da chama (a) é dada por:
$$a = \frac{V_c}{V_{cb}}$$

Em que V_c é o volume de comburente (oxigênio) e V_{cb} é o volume do combustível (gás).

Com base na definição de regulagem de chama (a), o Quadro 3.2, a seguir, mostra os três tipos de chamas e suas características.

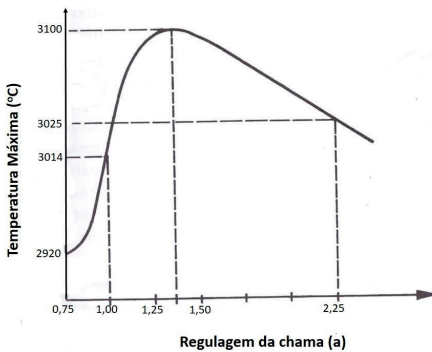
Quadro 3.2 | Tipos e características das chamas em soldagem oxi-gás

Regulagem da chama (a)	Tipo de chama	Formato da chama	Característica	Aplicação
$1,0 < a < 1,1$	NEUTRA		Penacho longo. Dardo branco, brilhante e arredondado.	Soldagem de aços (ou regulagem neutra, levemente redutora). Cobre e suas ligas (exceto latão). Níquel e suas ligas.
$a < 1,0$	REDUTORA		Penacho esverdeado. Véu branco circundando o dardo. Dardo branco, brilhante e arredondado. Chama menos quente.	Revestimento duro, ferro fundido, alumínio e chumbo.
$a > 1,1$	OXIDANTE		Penacho azulado ou avermelhado, mais curto e turbulento. Dardo branco, brilhante, pequeno e pontiagudo. Chama mais quente. Ruído característico.	Aços galvanizados (regulagem neutra, levemente oxidante). Latão. Bronze.

Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 182).

A chama tem uma temperatura máxima que é função de sua regulagem (a) e, para o acetileno, o gráfico mostrado na Figura 3.13, a seguir, ilustra o comportamento da temperatura versus regulagem (a) da chama. A partir da figura, é possível notar a existência de um ponto no qual ela atinge um ponto de máximo e, depois, começa a decrescer.

Figura 3.13 | Temperatura máxima para o acetileno em função da regulagem (a)



Fonte: adaptada de Wainer, Brandi e Mello. (2015, p. 183).

Além de ser possível soldar com o processo oxi-gás, é possível também realizar operações de corte em aços carbono comum e aços de baixa liga, processo conhecido como oxicorte. A Figura 3.14 ilustra um equipamento típico de um maçarico utilizado para corte. Os gases, chamados de “gases combustíveis”, utilizados para gerar a chama são os seguintes: acetileno, propano, GLP, gás natural, gás de nafta e hidrogênio. Desses gases, em geral, o acetileno é o mais utilizado e o hidrogênio é utilizado em corte subaquático.

Figura 3.14 | Maçarico de corte para oxicorte



Fonte: <<https://goo.gl/jMXEYs>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

O uso de oxicorte é amplamente aplicado, tanto para processos de fabricação, quanto para casos de reparo, seja em oficinas em geral ou nas indústrias.

Um processo muito conhecido que utiliza de oxi-gás é a “goivagem”, que consiste na remoção de defeitos de soldagem para reparação do cordão de solda, visando eliminar alguns tipos de defeitos (trincas e inclusões, por exemplo). A “goivagem” está relacionada também à preparação do chanfro para soldagem de seções complexas.

No oxicorte ocorre a separação de metais pelo calor e uma reação de oxidação com oxigênio puro. O processo consiste no metal atingir seu ponto de ignição a partir da aplicação de uma chama de aquecimento, ou seja, até que o metal entre em fusão. Na sequência, a formação de óxidos líquidos do metal é provocada a partir da aplicação de um jato de oxigênio puro nessa mesma área. A separação da base metálica em duas partes é possível devido à velocidade do jato de oxigênio puro, que permite a remoção do metal líquido. A capacidade do corte depende das regulagens de pressão e vazão necessárias para a geração de calor e extração dos óxidos durante o corte, além do porte dos equipamentos. O corte em aços de baixa, de média e de alta liga é possível para espessuras de 3 mm a 1.800 mm.



Pesquise mais

Visando aprofundar seu conhecimento sobre oxicorte, sugerimos a leitura das páginas de 201 a 207, do capítulo 3b, intitulado Oxicorte e processos afins, do livro a seguir:

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015.

Boa leitura e boa pesquisa!

Seleção de parâmetros de soldagem

Vimos, até o momento, uma série de tipos de soldagem, dentre elas os seguintes processos: soldagem a arco elétrico MIG/MAG, a arco elétrico TIG, soldagem com eletrodo revestido e nu, soldagem com arame tubular. Nesta seção, estamos estudando soldagem oxi-gás e aprendendo sobre a solda a arco submerso. Veja que são processos de soldagem predominantemente elétricos, com exceção à solda oxi-gás, e que, mesmo assim, apresentam características

típicas e parâmetros de soldagem específicos. Logo, não é possível generalizar os mesmos parâmetros para todos os processos; sendo assim, vamos conhecer os principais de cada processo a seguir.

Antes, porém, é importante ficar claro que, dentre os parâmetros de soldagem (de soldas elétricas) estão a amperagem, a voltagem, a velocidade de soldagem, a posição da solda, o tipo de consumível (eletrodo ou arame), o tipo de gás e sua vazão, dentre outros.

Importante também é ter consciência de que os parâmetros de soldagem podem ser especificados de forma adequada ao processo de soldagem que será utilizado, fazendo uso de informações de catálogos de fabricantes.

a) **Soldagem MIG/MAG:** conforme já estudamos, esse tipo de solda pode ocorrer segundo três processos distintos: (i) curto-circuito; (ii) pulverização; e (iii) pulsação. Para cada uma dessas modalidades, há parâmetros específicos de soldagem, como veremos no *item Exemplificando*, a seguir.



Exemplificando

A Tabela 3.2, a seguir, indica uma sugestão de parâmetros de soldagem MAG (não aplicável à MIG) e com transferência por curto-circuito.

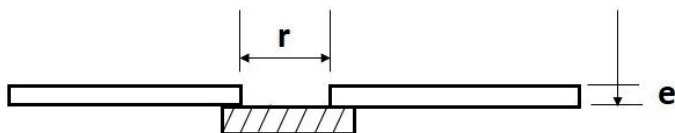
Tabela 3.2 | Parâmetros de soldagem em junta topo-a-topo*, na posição plana para aço carbono ou de baixa liga

e (mm)	r (mm)	Φ do eletrodo nu (mm)	Velocidade de alimentação do eletrodo (m/min)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
1,6	0,8	0,8	6,6	110 – 130	19	63
	1,6	1,2	4,3	140 – 160	20	89
3,0	1,2	0,8	7,6	120 – 140	21	51
	1,6	1,2	4,3	140 – 160	21	63

Fonte: adaptada de Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 117).

Nota (*): os valores de e (mm) e de r (mm) para a junta topo-a-topo referem-se à configuração mostrada na Figura 3.15:

Figura 3.15 | Junta topo-a-topo e seus parâmetros e (mm) e r (mm)



Fonte: adaptada de Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 122).

Observe que o item apresentado, *Exemplificando*, trata da soldagem MAG. Para a soldagem MIG, veja o box *Pesquise mais*, mostrado a seguir.



Pesquise mais

Para se aprofundar no conhecimento e aplicação dos parâmetros de soldagem para a solda MIG, leia as páginas indicadas do livro a seguir:

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015. p. 117-119.

Boa leitura e boa pesquisa!

b) **Soldagem TIG**: como vimos, esse processo de soldagem pode ser realizado com dois tipos de correntes: (i) CC – corrente contínua; e (ii) CA – corrente alternada. Além disso, é possível ter CC(+) e CC(-) e essas variações afetam diretamente os parâmetros de soldagem. Assim, a correta seleção dos parâmetros exige o uso de tabelas fornecidas por fabricantes em seus catálogos de produtos. Na Tabela 3.3 vemos um exemplo para fins de conhecimento.

Tabela 3.3 | Valores recomendados para solda TIG de alumínio e suas ligas em corrente alternada (CA)

e (mm)	PS	Tipo Junta	Corrente (A)	De (mm)	Dma (mm)	Va (l/mim)	NP
1,6	P	Solda sem chanfro	70 – 100	1,6	2,4	10	1
	H.V		70 – 100			10	
	SC		40 – 60			12	
3,2	P	Solda sem chanfro	125 – 160	2,4	3,2	10	
	H.V		115 – 150			10	
	SC		115 – 150			12	
6,4	P	V, 60°	225 – 275	4,0	4,8	15	2
	H.V	V, 60°	200 – 240			15	
	SC	V, 100°	210 – 260			17	
9,5	P	V, 60°	325 – 400	6,4	6,4	17	2
	H.V	V, 60°	250 – 320	4,8		17	3
	SC	V, 100°	275 – 350	4,8		20	3
12,7	P	V, 60°	375 – 450	6,4		17	3
	H.V	V, 60°	250 – 320	4,8		17	3
	SC	V, 100°	275 – 340	4,8		20	4
25,4	P	V, 60°	500 – 600	8,0	6,4	17 – 25	8 – 10
				9,5	9,5		

Fonte: adaptada de Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 97).

Na Tabela 3.3, temos que e (mm) é a espessura da chapa; PS é a posição de soldagem; De é o diâmetro do eletrodo (de tungstênio puro ou com zircônio), dado em [mm]; D_{ma} é o diâmetro do metal de adição, dado em [mm]; Va é a vazão de argônio, dada em [l/mm]; NP é o número de passes; P é a posição plana de soldagem; H.V significa Horizontal.Vertical; SC significa Sobrecabeça; V, 60° é um chanfro em V com ângulo de 60° ; e V, 100° é um chanfro em V com ângulo de 100°.



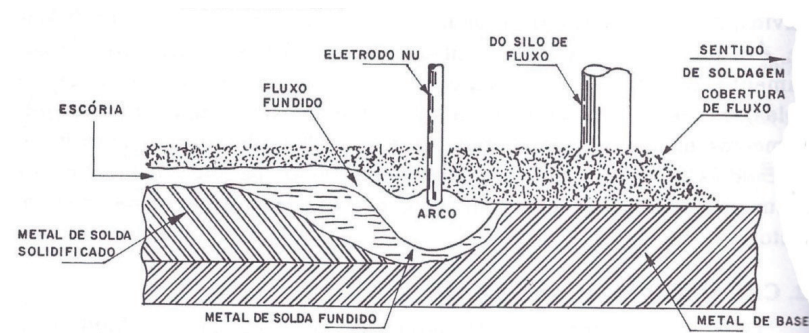
Além dos parâmetros de soldagem TIG para o alumínio e suas ligas, é interessante pesquisar tabelas para outros materiais. Sendo assim, vide as páginas de 96 a 98, do livro do Wainer et al. (2015), já indicado nesta seção.

Soldagem a arco submerso (SAW) e tipos de fluxo

A soldagem a arco submerso (SAW – *Submersed Arc Welding*) é um processo no qual o arco é protegido pelo fluxo, que é definido como uma camada de um material mineral granulado, tornando o arco invisível (coberto) sem a ocorrência de faíscas, respingos ou fumos. Torna-se, assim, uma solda menos agressiva ao operador, visto que é um método predominantemente automatizado.

A proteção realizada pelo fluxo vai além do arco, pois protege também o arame e a peça soldada contra eventuais contaminações da atmosfera. A Figura 3.16 mostra o desenho esquemático de um sistema de soldagem a arco submerso completo.

Figura 3.16 | Sistema de soldagem a arco submerso



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 134).

A solda a arco submerso trabalha com os seguintes parâmetros de soldagem:

- Amperagem: de 300 A até 2000 A em CC ou AC.
- Espessura soldadas: até 16 mm (em monopasse) e sem limites em passes diversos.
- Velocidade de soldagem: até 500 cm / min .

- Posição: preferencialmente na horizontal (admite-se, em alguns casos, leve inclinação de até 15° com a poça de fusão).
- Tensão da fonte: 440 V.

O fluxo granular que formará a capa de escória protetora do cordão de solda é composto a base de cal, sílica, óxido de manganês, fluoreto de cálcio e outros elementos. Uma característica importante do fluxo é que este, quando em excesso e não utilizado na soldagem, pode ser reprocessado e colocado novamente para uso.



Assimile

O fluxo, utilizado em processos de soldagem, que tem a função básica de proteger a solda, pode ser líquido, em pó ou em pasta; sendo que na soldagem a arco submerso, porém, só é possível utilizar fluxo em pó (granular).

O arame de preenchimento da junta de solda pode ser do tipo nu ou levemente revestido por cobre. O eletrodo (aramé) é fornecido em bobina de arames de 1,0 mm até 10,0 mm de diâmetro. A Figura 3.17 ilustra uma máquina de soldagem a arco submerso em operação.

Figura 3.17 | Máquina de soldagem a arco submerso em operação



Fonte: <<https://goo.gl/3DpG9w>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Entre as principais aplicações da soldagem a arco submerso, destacam-se: construção de navios (em estaleiros); vasos de pressão que operam com trabalho pesado; e engenharia *offshore* (no mar).

As vantagens e desvantagens da soldagem a arco submerso são listadas a seguir:

a) Vantagens:

- Chapas finas podem ser soldadas com facilidade com apenas um passe.
- A qualidade da solda produzida é excelente, com propriedades uniformes.
- Solda com facilidade aço carbono comum, aços de médio carbono, aços de alta resistência ao calor, aços resistentes à corrosão, aços de alta resistência e metais não ferrosos, tais como Monel (conjunto de ligas metálicas de alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão atmosférica, aos ácidos e álcalis e à água salgada. O ponto de fusão é bastante elevado, por volta de 2.400 °C), níquel, dentre outros.
- Alta velocidade de deposição devido ao uso de elevadas correntes ou usando mais de um arame (eletrodo) simultaneamente.
- Não produz fumaça.
- O arco fica oculto, permitindo ao operador trabalhar sem máscara e sem provocar distúrbios nas vizinhanças da soldagem.
- A solda apresenta elevado rendimento, economia e rapidez no processo.

b) Desvantagens (ou limitações):

- Somente fluxo sólido pode ser utilizado.
- O uso de fluxo em pó implica a realização da soldagem na horizontal.
- Não é possível soldar chapas com menos de 1,8 mm devido à elevada penetração da solda.
- Não é possível juntar as extremidades de duas peças com mais de 16 mm de espessura, a não ser que ocorra preparação especial para o evento.

Automatização de processos de soldagem

O sistema produtivo, em muitos casos, exige flexibilidade, repetitividade e produção em larga escala, tornando obrigatória

a instalação de sistemas automatizados de produção. Isso se aplica também aos processos de soldagem.

Em linhas gerais, existem dois sistemas: um automático e outro automatizado. O automático é aquele que tem a capacidade de realizar tarefas pré-definidas sem a interferência do homem; o sistema automatizado é aquele que exige interferência externa (do homem) quando as variáveis externas e de parâmetros, durante a soldagem, não estiverem em conformidade e resultarem em uma ação incorreta.

Os processos de soldagem TIG, MIG/MAG, soldagem com arame tubular e, principalmente, a soldagem a arco submerso são mais facilmente automatizados, enquanto a automatização para soldagem com eletrodo revestido é pouco comum.

Os dispositivos têm como funções fixar a peça e promover movimentos que proporcionem ao soldador ou operador a execução do cordão de solda, da maneira mais rápida e eficiente possível (INFOSOLDA, [s.d.]).

Embora possam ser classificados como automatizados, os sistemas de solda por robôs (robotizados) pertencem a uma categoria diferente de automatização de soldagem. A soldagem por robôs é classificada como CIM, que significa Produção Integrada por Computador, pois há uma coordenação (conjunta) entre operações de robôs e CNC (Comando Numérico Computadorizado).

Nos sistemas de automatização, destacam-se os seguintes dispositivos: mesa posicionadora, mesa giratória e os manipuladores. Vejamos cada um deles a seguir.

Mesa posicionadora: é um equipamento que visa facilitar o processo de soldagem, posicionando peças de diversos portes, a fim de aprimorar a soldagem e garantir melhores resultados, como mostra a Figura 3.18, a seguir. É muito utilizada na fabricação de conjuntos soldados, seja por processos manuais, semiautomáticos, automáticos, automatizados ou robotizados. A mesa é um prato giratório que pode ser acoplado a um comando externo de sincronismo. Os principais tipos são os seguintes: mesa fixa na horizontal (mesa giratória horizontal),

mesa fixa na vertical e mesa de conjuntos duplos contrapostos (para a soldagem de estruturas longas) (INFOSOLDA, [s.d.]).

Figura 3.18 | Mesa posicionadora de soldagem



Fonte: <<https://goo.gl/LWJM3j>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Mesa giratória: permite uma operação de soldagem mais dinâmica e com grande aplicação em sistemas robotizados. As versões com divisões fixas e equidistantes da mesa giratória para solda (normalmente quatro divisões) possuem acionamento pneumático, hidráulico ou elétrico. A Figura 3.19 ilustra um modelo de mesa giratória para soldagem.

Figura 3.19 | Mesa giratória para soldagem



Fonte: <<https://goo.gl/8VHbuz>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Manipuladores: a escolha de um manipulador de soldagem é feita de acordo com o número de eixos de movimentação e com a proporção dos braços. Os processos que mais empregam manipuladores são: arco submerso, MIG/MAG e arame tubular (INFOSOLDA, [s.d.]).

Dentre os sistemas de soldagem automatizados, temos dois tipos mais comuns:

(a) **Soldagem orbital:** utilizado nos processos TIG, MIG/MAG, plasma e arco submerso. O sistema de soldagem orbital é controlado pela fonte por meio de microprocessadores e é composto basicamente por motorreduzidores de corrente contínua. Existem sistemas mais sofisticados que contêm também motores de passo e controle automático da tensão do arco (INFOSOLDA, [s.d.]).

(b) **Soldagem com chanfro estreito ("*narrow gap*"):** a soldagem "*narrow gap*" ou chanfro estreito (NGW - *Narrow Gap Welding*) é um tipo de solda que faz uso de multipasse na junção de chapas de maior espessura, sendo que as juntas devem estar muito próximas e retas. Foi desenvolvida para soldagem a arco elétrico pelos processos MIG/MAG, arco submerso e, em alguns casos, arame tubular. Quando operado como MIG/MAG, é indicado para soldar chapas espessas de aço carbono e de baixa liga. Ao operar a soldagem "*narrow gap*" a preparação adequada do chanfro influencia o resultado final da solda (INFOSOLDA, [s.d.]).

O equipamento para o sistema "*narrow gap*" é o mesmo utilizado nos processos MIG/MAG, arame tubular e arco submerso, porém com algumas adaptações: é necessário projetar tochas ou bicos especiais para resfriamento da água, isolamento elétrico no bico de contato e dispositivo de proteção gasosa, quando requerido. Também é necessário prever um sistema de alimentação de arame, que pode ser o sistema padrão da máquina, um sistema de oscilação de arame e um sistema de controle de fusão com arame reto (INFOSOLDA, [s.d.]).



Refleta

A automatização de muitos processos de fabricação facilitou as operações e contribuiu de forma significativa para a diminuição dos acidentes de trabalho. Por outro lado, passou a exigir maior capacitação do profissional e criou novas oportunidades de trabalho em automação industrial. No caso particular dos processos de soldagem, que envolvem calor e corrente elétrica com valores elevados e são processos de elevada periculosidade, você acredita que acontecerá a mesma coisa? Será que é possível automatizar em 100% todos os processos de soldagem?

CAD-CAM e CNC na automação da soldagem

A introdução do computador como um elemento auxiliar, seja na elaboração de projetos ou na fabricação de peças e produtos, contribuiu de forma significativa para a automação da produção e, por consequência, dos processos de soldagem.

A simulação, por meio da tela de um monitor, dos movimentos da soldagem realizada por um robô pode ser realizada facilmente por um sistema CAD (Computer Aided Design ou, traduzindo, Desenho Assistido por Computador), que descreve a cinemática (movimentos) do modelo, na fase de projeto. Pelo programa, os dados são transmitidos ao robô, que é capaz de realizar as operações de maneira repetitiva no status off-line. O sistema CAD, por sua vez, auxilia na programação do robô, permitindo a realização de outra tarefa.

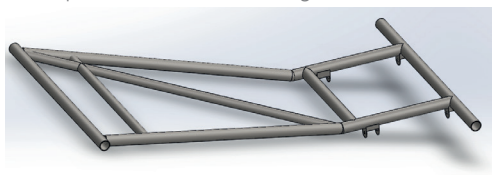
Além do CAD, tem-se o sistema CAM (Computer Aided Manufacturing ou, traduzindo, Manufatura Assistida por Computador) que incorpora todo o sistema CNC (Comando Numérico Computadorizado), que é responsável pelo controle da programação do equipamento para fabricação automática da peça.

A robótica se trata de uma técnica que proporciona uma vasta variedade de funções de manejo de material, indo desde o posicionamento das peças até a soldagem em si. Assim, tem-se os sistemas CAD-CAM e CNC aplicados à soldagem.

Sem medo de errar

Caro aluno, lembre-se de que você é um integrante de uma equipe de competição Baja SAE e que, na equipe, sua responsabilidade é projetar e fabricar (por soldagem) a gaiola do veículo de competição. A estrutura da gaiola é de tubos de aço SAE 1020 (aço estrutural), com as seguintes dimensões: tubo de 1"1/4 x 2,65 (1 polegada e um quarto com parede de 2,65 mm). A Figura 3.10 mostra um desenho esquemático de parte dessa gaiola.

Figura 3.10 | Desenho esquemático dos tubos da gaiola



Fonte: <<https://goo.gl/kXW59s>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Você poderá criar a sua folha de registro ou buscar um modelo simplificado na internet. Segue uma sugestão de folha de registro simplificada, mostrada no Quadro 3.3, a seguir:

Quadro 3.3 | Folha de registro (simplificada) de soldagem

EQUIPE BAJA SAE	REGISTRO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
SOLDADOR	(NOME)
METAL BASE	AÇO SAE 1020
MATERIAL	Tubo de espessura 2,65 mm
Processo de soldagem	TIG
Amperagem	50 A – 100 A
Eletrodo	EWTh-2
Proteção	Argônio
Vazão(l/min)	7 – 9
Diâmetro do eletrodo (mm)	2,4
Posição de soldagem	Plana

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/3Kj75U>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

Após a reunião de equipe, das opções de soldagem para a gaiola optou-se pela TIG, por ser uma solda mais limpa e fornecer melhores resultados para esse tipo de aplicação.

Apesar dessa escolha da solda TIG, seria viável o uso de soldagem a arco submerso? Não nesse caso. Embora a soldagem seja predominantemente na posição plana, trata-se de soldagem de tubo de pequeno diâmetro de 1”1/4, de uma estrutura de gaiola. A solda TIG para essa aplicação é muito mais flexível e tem baixo custo.

Concluída a sua resolução dessa problematização, você deverá emitir um relatório (com base na folha de registro) para apresentar à sua equipe durante a reunião.

Note que, para chegar à solução do problema, você fez uso dos conteúdos disponibilizados nesta seção, usou sua criatividade e capacidade de resolução de problemas, buscando dados de fabricantes na internet. Todas essas características são de fundamental importância, tanto para sua vida acadêmica como profissional.

Avançando na prática

Parâmetros de soldagem para soldar alumínio utilizando TIG

Descrição da situação-problema

Suponha que você terá de determinar os parâmetros de soldagem necessários para soldar uma chapa de alumínio de espessura igual a $\frac{1''}{4}$, fazendo uso de solda TIG com CA (corrente alternada) na

posição horizontal. O soldador da empresa necessita de todas as informações pertinentes para operar a soldagem de maneira adequada. Portanto, quais seriam as especificações para essa operação? Foi solicitado a você a elaboração de um gráfico, relacionando a espessura da chapa e a amperagem média, para soldagens nas posições horizontal e vertical, com base na tabela utilizada para especificar os parâmetros de soldagem anteriores.

Resolução da situação-problema

Para solucionarmos essa problematização, podemos recorrer à Tabela 3.3.

Tabela 3.3 | Valores recomendados para solda TIG de alumínio e suas ligas em corrente alternada (CA)

e (mm)	PS	Tipo Junta	Corrente (A)	De (mm)	Dma (mm)	Va (l/mim)	NP
1,6	P	Solda sem chanfro	70 – 100	1,6	2,4	10	1
	H.V		70 – 100			10	
	SC		40 – 60			12	
3,2	P	Solda sem chanfro	125 – 160	2,4	3,2	10	
	H.V		115 – 150			10	
	SC		115 – 150			12	
6,4	P	V, 60°	225 – 275	4,0	4,8	15	2
	H.V	V, 60°	200 – 240			15	
	SC	V, 100°	210 – 260			17	
9,5	P	V, 60°	325 – 400	6,4	6,4	17	2
	H.V	V, 60°	250 – 320	4,8		17	3
	SC	V, 100°	275 – 350	4,8		20	3

12,7	P	V, 60°	375 – 450	6,4	6,4	17	3
	H.V	V, 60°	250 – 320	4,8		17	3
	SC	V, 100°	275 – 340	4,8		20	4
25,4	P	V, 60°	500 – 600	8,0	6,4	17 – 25	8 – 10
				9,5			

Fonte: adaptada de Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 97).

Para uma chapa de alumínio de $e = \frac{1}{4}'' = 6,35 \text{ mm}$, temos:

- Corrente = 200 A a 240 A.
- Diâmetro do eletrodo (W) = 4,0 mm.
- Diâmetro do metal de adição (vareta) = 4,8 mm.
- Vazão de argônio = 15 l/min.
- Número de passes (NP) = 2.

Para traçar o gráfico de espessura (mm) de chapa versus amperagem média, a partir da Tabela 3.3 elaboramos a Tabela 3.4, que apresenta valores médios de corrente (I):

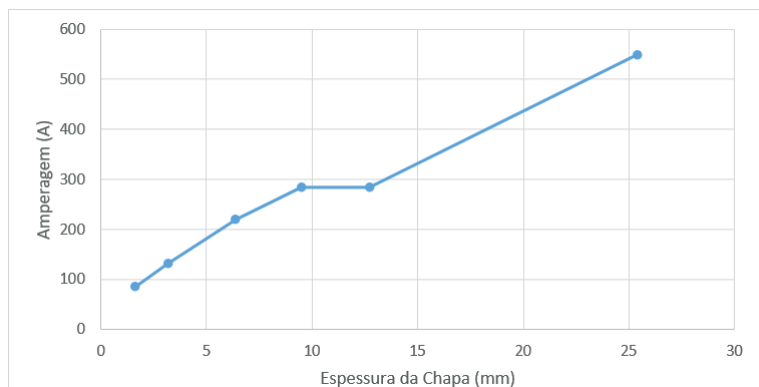
Tabela 3.4 | Relação entre espessura (e) de chapa de alumínio e amperagem (I) média para soldagem

e (mm)	1,6	3,2	6,4	9,5	12,7	25,4
I (A)	85	132,5	220	285	285	550

Fonte: elaborada pelo autor.

A partir de uma pequena planilha Excel, é possível plotar o gráfico mostrado na Figura 3.20, a seguir.

Figura 3.20 | Gráfico de espessura (mm) de chapa versus amperagem (A) média para solda TIG



Fonte: elaborada pelo autor.

Com esses resultados em mãos, você terá chegado ao final da resolução dessa problematização, na qual você indicou os parâmetros de soldagem solicitados e traçou o diagrama de espessura *versus* amperagem média para solda TIG em alumínio.

Note que, com esse gráfico, você pode verificar diretamente qual amperagem deve ser utilizada em função da espessura da chapa a ser soldada, permitindo, inclusive, interpolações de valores de espessuras. O gráfico é um auxiliar alternativo à Tabela 3.3.

Faça valer a pena

1. A qualidade da soldagem oxi-gás, além da necessidade de boa habilidade do soldador, depende de parâmetros, tais como: a regulagem da chama (a), dada pela relação entre o volume de comburente e o volume do combustível. Observou-se em um gráfico de abertura da chama (a) versus temperatura máxima da chama que, para o valor de $a = 1,30$, a temperatura correspondente era de 3100°C .

A partir dessa constatação, considere as seguintes sentenças e julgue-as verdadeiras (V) ou falsas (F).

- (I) O comburente é o oxigênio e o combustível é o gás da mistura.
- (II) Para $a = 1,30$, o volume de comburente é menor do que o volume de combustível.
- (III) Para o valor de $a = 1,30$, a chama tem característica oxidante.
- (IV) Os gases, chamados de “gases combustíveis”, utilizados para gerar a chama são os seguintes: acetileno, propano, GLP, gás natural, gás de nafta e oxigênio.

Com base na sequência de valores lógicos V (verdadeira) e F (falsa) das afirmações anteriores, marque a alternativa que contém a ordem correta:

- a) V – V – V – V.
- b) F – V – F – V.
- c) V – F – V – F.
- d) F – F – V – V.
- e) V – V – F – F.

2. Entre os processos de soldagem ditos “convencionais”, destacam-se as soldas oxi-gás e as soldas MIG/MAG que, embora distintas, apresentam algumas similaridades. Analise as afirmativas e as relações entre elas:

- (I) As soldas oxi-gás e as soldas MIG/MAG fazem uso de gás durante o processo de soldagem,

POIS:

(II) Tanto na solda oxi-gás como nas soldas MIG/MAG, o gás utilizado tem a função de proteger o cordão de solda.

Marque a alternativa que tem a afirmação correta.

- a) As afirmativas (I) e (II) são corretas e a afirmativa (II) complementa a (I).
- b) A afirmativa (I) é correta, mas a afirmativa (II) é falsa.
- c) A afirmativa (I) é falsa, mas a afirmativa (II) é verdadeira.
- d) As afirmativas (I) e (II) são corretas, mas a afirmativa (II) não complementa a (I).
- e) As afirmativas (I) e (II) são falsas.

3. Considere os seguintes processos de soldagem:

- (A) Oxi-gás.
- (B) MIG/MAG.
- (C) TIG.
- (D) Arco submerso.

Os processos de soldagem apresentados nos itens de (A) até (D), têm os seguintes elementos de soldagem (consumíveis ou não), apresentados nos itens de (I) até (IV):

- (I) Eletrodo nu permanente (sem desgaste).
- (II) Arame de solda revestido ou não.
- (III) Fluxo granular e eletrodo (arame) consumível.
- (IV) Maçarico e eletrodo de preenchimento.

Assinale a alternativa que apresenta a associação correta:

- a) A – II; B – I; C – III; D – IV.
- b) A – III; B – IV; C – I; D – II.
- c) A – I; B – II; C – III; D – IV.
- d) A – II; B – III; C – IV; D – I.
- e) A – IV; B – II; C – I; D – III.

Seção 3.3

Tratamentos térmicos e análise estrutural

Diálogo aberto

Prezado aluno, nesta seção você estudará e aprenderá os conceitos de tratamentos térmicos aplicados em soldagem. Para tanto, você conhecerá: (a) microestrutura de soldas por fusão; (b) tratamentos térmicos em cordões e metal de solda; e (c) análise macroestrutural de solda.

Há de se entender que os tratamentos térmicos, mesmo aplicados em soldas, são importantes por contribuírem para modificar ou ajustar as propriedades do material soldado, sem mudar sua forma, sendo fundamentais para conferir à solda propriedades e características metalúrgicas próprias para determinadas aplicações. As indústrias da área metal-mecânica fazem uso dos tratamentos térmicos para adequarem seus produtos às propriedades mecânicas de resistência, de conformabilidade, de usinabilidade, entre outras.

Dentro do nosso contexto de aprendizagem, lembre-se de que você é um membro integrante da equipe de competição Baja SAE do seu curso, tendo como responsabilidade fazer a estrutura da gaiola do veículo. Durante a operação de soldagem da gaiola do Baja, observou-se que o cordão de solda apresentava trincas discretas devido a tensões residuais. Essas tensões surgem na peça soldada devido ao fenômeno da dilatação térmica, causada pelo calor gerado durante o processo. Observou-se também uma certa porosidade no cordão de solda.

Dada a ocorrência desse problema, você foi incumbido de, usando toda sua criatividade, determinar qual o tratamento térmico mais adequado para solucionar essa questão. Você deverá especificar o tratamento térmico e esquematizar em um gráfico de tempo (min) versus temperatura ($^{\circ}\text{C}$) as etapas desse tratamento térmico, pois esse gráfico será um norteador do tratamento realizado e deverá ser parte integrante do seu relatório final.

Você seria capaz de estimar qual a microestrutura do cordão de solda e da ZTA (Zona Termicamente Afetada)? Seria possível uma

análise macroestrutural da solda? Visto que o resultado da soldagem pode ser melhorado pela utilização de um tratamento térmico, quais seriam esses tratamentos térmicos?

Lembramos que as suas conclusões, obtidas ao final da resolução dessa problematização, deverão ser apresentadas na forma de um relatório para o chefe da equipe Baja.

Note que todo o conteúdo disponibilizado nesta seção será de extrema importância para a uma solução do problema em questão. Além disso, o conhecimento da correta aplicação de tratamentos térmicos, seja em soldas ou em outras situações, é importante para seu futuro desempenho profissional.

Bom trabalho!

Não pode faltar

Microestrutura de soldas por fusão

As microestruturas dos materiais metálicos definem suas propriedades mecânicas, visto que são resultados de um arranjo atômico (cristalino) decorrente do processo de solidificação do metal. Essas estruturas cristalinas configuram-se como diversos arranjos, mas são três os que mais se destacam: cúbico de face centrada (CFC), cúbico de corpo centrado (CCC) e o hexagonal compacto (HC). O cordão de solda que é formado a partir da fusão do metal base e de preenchimento obedece a essa mesma formação cristalina. Vejamos a seguir, no Quadro 3.4, os principais metais e suas correspondentes estruturas cristalinas.

Quadro 3.4 | Estruturas cristalinas de metais

Cúbico de Face Centrada (CFC)			
Alumínio	Cobalto	Cobre	Ouro
Ferro(*)	Chumbo	Níquel	Prata
Cúbico de Corpo Centrado (CCC)			
Cromo	Ferro(*)	Molibdênio	Nióbio
Titânio	Tungstênio	Vanádio	Zircônio
Hexagonal Compacto (HC)			
Cobalto	Magnésio	Estanho	
Titânio	Zinco	Zircônio	

Nota(*): (i) lembrando que o Ferro é cúbico de corpo centrado ($Fe-\delta$) próximo à temperatura de fusão e à baixas temperaturas prevalece o ($Fe-\alpha$), mas para temperaturas intermediárias o ferro é cúbico de faces centradas ($Fe-\gamma$); (ii) a estrutura cristalina de um metal varia com a temperatura.

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/CyVwzp>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

A microestrutura é também formada por um conjunto orientado de grãos, que se formam à medida que a poça de fusão vai se solidificando. O início da formação desses grãos (que, vale lembrar, são cristais que se desenvolvem segundo determinadas orientações) ocorre a partir do ponto de menor temperatura na solda, como mostra a Figura 3.21 a seguir. Assim, temos que o tamanho final dos grãos têm enorme influência na resistência mecânica da solda.

Figura 3.21 | Processo de solidificação de uma junta soldada



Fonte: <<https://goo.gl/7s6fuA>>. Acesso em: 16 ago. 2018.



Refleta

Pense um pouco: nos metais, quais tipos de organização cristalina têm maior influência nas propriedades mecânicas da solda? A microestrutura (CCC, CFC ou HC) ou a estrutura de grãos?

Soldas com granulação fina apresentam melhores propriedades mecânicas na temperatura ambiente e em baixas

temperaturas quando em serviço, e soldas com granulometria maior (mais grosseira) têm desempenho melhor em aplicações a altas temperaturas.

Em alguns tipos de metal de solda, como os aços ferríticos, há uma classificação dos seus microconstituintes proposta por Wainer (2015, p. 406-407) a saber:

- Ferrita primária: ocorre em contornos de grãos ou intragranular.
- Ferrita acicular: são grãos de ferrita não alinhados que se formam na faixa de temperatura entre $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Ferrita com fase secundária: pode ocorrer de forma alinhada (também conhecida como ferrita de Widmanstätten ou bainita) e de forma não alinhada nos contornos de ferrita acicular.
- Agregados de ferrita/carboneto: ocorrem na forma de precipitados de interface.
- Martensita: pode ser do tipo martensita escorregada (*lath*) ou martensita maclada (*twin*).

Por metalografia quantitativa (realizada com auxílio de microscópio) é possível quantificar, no metal de solda, a presença dos microconstituintes citados e, assim, antever o comportamento mecânico da solda.

No resfriamento da ZTA, a ocorrência de transformações de fases é mais limitada e não se observa alteração da composição química tal como ocorre no metal de solda. Com o aquecimento durante a soldagem, ocorre um crescimento de grãos, fato que contribui para elevar a temperabilidade do aço.

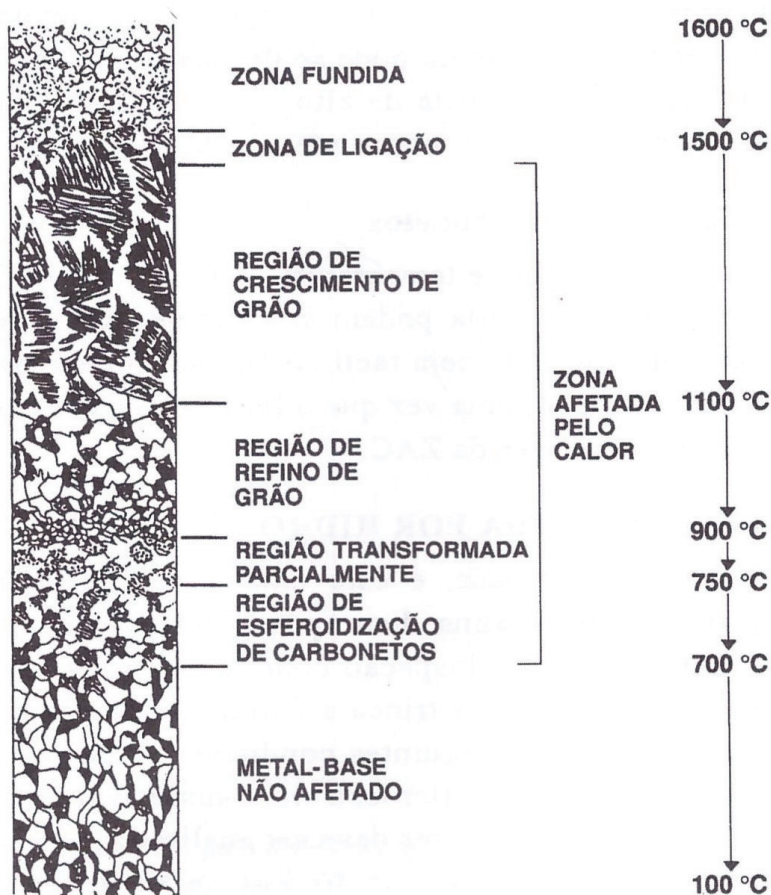
Para um aço carbono, a ZTA pode ser dividida nas seguintes regiões de transformação:

- Região de crescimento de grãos.
- Região de refino de grãos.
- Região de transformação parcial.
- Região de esferoidização de carbonetos.

- Região do metal base não afetada pelo calor (não sendo a ZTA nesse caso).

A Figura 3.22 nos mostra a ocorrência dessas regiões da ZTA.

Figura 3.22 | Regiões da ZTA e suas temperaturas de ocorrência



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (2015, p. 420).

Deve-se ter em mente que as duas regiões do metal soldado (a região do metal de solda e a ZTA) apresentam distintas velocidades de resfriamento e, portanto, temos a existência de microestruturas diferentes em ambas. Essa é uma importante justificativa para se submeter o metal de solda a tratamentos térmicos.



Saiba mais sobre os fenômenos que acontecem nas transformações no estado sólido em aços carbono soldados, lendo o capítulo 8d, Transformações no estado sólido de aços-carbono, do livro a seguir:

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015. p. 403-419.

Boa pesquisa e bons estudos!

Tratamentos térmicos em cordões e em metais de solda

Antes de falarmos especificamente em tratamentos térmicos (TT), vamos deixar bem clara a diferença entre cordão de solda e metal de solda. O primeiro (cordão de solda) é o depósito resultante de um ou mais passes ou filetes de solda; o segundo (metal de solda) é também conhecido como metal de adição, como os eletrodos, arames e fluxos. Assim, neste tópico estudaremos os possíveis TT em cordões de solda (formados pela união entre o metal base e o metal de adição/solda).

O conceito de tratamento térmico deve estar presente em seus estudos, mas é sempre importante lembrar: trata-se de uma operação que envolve o aquecimento (controlado) a uma determinada temperatura, na qual o material permanece por um determinado tempo (patamar de permanência) e, posteriormente, é resfriado também em uma velocidade de resfriamento controlada, visando alcançar as condições microestruturais necessárias à obtenção das propriedades mecânicas desejadas. Portanto, os TTs seguem um determinado ciclo térmico pré-determinado.

Vimos que os cordões de solda se formam a partir da solidificação da poça de fusão, adquirindo uma estrutura granular e uma microestrutura cristalina que influem em suas propriedades mecânicas. No entanto, em alguns casos, é necessário modificar a forma estrutural do cordão de solda (grãos e microestrutura) para adequá-la às propriedades mecânicas desejadas; daí a necessidade de se aplicar, no cordão de solda, tratamentos térmicos adequados.

Os principais TTs aplicáveis em cordão de solda são os seguintes:

- a) Recozimento.
- b) Normalização.
- c) Revenimento.
- d) Solubilização.
- e) Têmpera.
- f) Pré-aquecimento.
- g) Alívio de tensões.

Vejamos brevemente cada um deles:

a) Recozimento: em algumas situações, pode acontecer de o cordão de solda encruar devido a processos mecânicos (conformação). Esse tratamento visa reduzir o grau de encruamento e, conseqüentemente, diminuir a dureza da solda; o resfriamento ocorre da forma mais lenta possível (ou seja, dentro do próprio forno, a partir do seu desligamento) e parte do campo da fase austenítica do material, resultando em uma microestrutura com percentuais elevados de ferrita e perlita.

No caso das soldas em aço, no recozimento, ao atingir a temperatura de tratamento, o aço deve ficar por um determinado tempo nesse patamar a fim de homogeneizar sua estrutura austenítica, permitindo, inclusive, uma nova recristalização de grãos. Nesse tipo de tratamento, o resfriamento ocorre, necessariamente, dentro do forno.

b) Normalização: ocorre de forma similar ao recozimento (durante o processo de aquecimento e estabilização no patamar de temperatura de tratamento). Porém, o resfriamento é um pouco mais rápido (pode ocorrer ao ar livre). Um caso típico ocorre quando se utiliza fluxo na soldagem, pois, ao se resfriar, ele forma uma capa de proteção para o cordão de solda que se resfia em uma taxa (velocidade) menor (mais suave) do que se ele se resfriasse ao ar sem proteção e mais rapidamente do que no forno. Com isso, obtém-se um cordão de solda mais uniforme, com boa tendência a não apresentar tensões residuais de resfriamento.

c) Revenimento: este tratamento térmico se aplica ao cordão de solda resfriado de forma muito rápida (brusca) e sem controle, visando diminuir os efeitos da martensita, que provoca elevada dureza (nem sempre desejada) na solda; não se deve confundir o revenimento com o alívio de tensões, pois a temperatura de trabalho no revenimento é menor (em torno de **400 °C** a **650 °C**).

d) Solubilização: é um tipo de tratamento térmico que objetiva diluir (ou eliminar) precipitados que aparecem no cordão de solda; geralmente é aplicado em aços inoxidáveis e em ligas não ferrosas (alumínio, por exemplo). São utilizadas temperaturas próximas do ponto de fusão do metal, porém em regiões monofásicas.

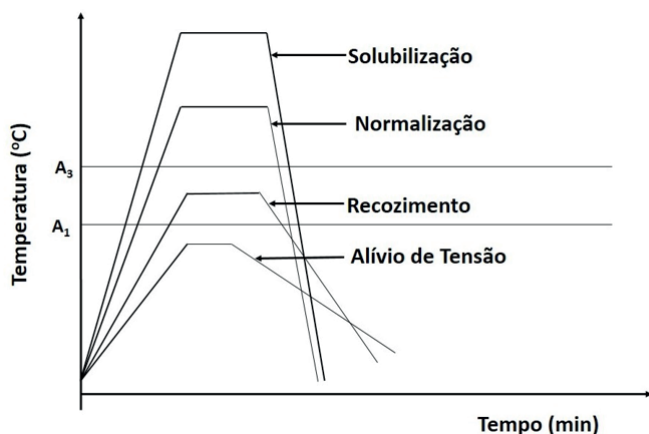
e) Têmpera: este tratamento térmico leva o cordão de solda a ter uma microestrutura com predomínio de martensita (no caso dos aços) e, conseqüentemente, é aplicado quando é desejável aumentar a resistência mecânica, ao desgaste e ao escoamento.

f) Pré-aquecimento: este procedimento não chega a ser um tratamento térmico típico (pois não se observa transformação de fase sólida no metal), mas é tão somente uma técnica para auxiliar no processo de soldagem, visando diminuir a velocidade de resfriamento do cordão de solda e, assim, evitar ocorrências de trincas e tensões superficiais. É interessante notar que ele ocorre através da inserção de uma fonte de calor adicional na peça quando se executa uma soldagem.

g) Alívio de tensões: não se deve confundi-lo com o pré-aquecimento e nem com o revenimento, pois nesse tipo de tratamento o cordão de solda é aquecido abaixo da temperatura crítica de transformação de fase (e bem acima da temperatura de pré-aquecimento), na qual permanece por um tempo determinado (tempo e temperatura de aquecimento são funções da espessura da chapa soldada). Considere ainda que é utilizado para aumentar a ductilidade, diminuir a dureza e melhorar as condições metalúrgicas da zona afetada pelo calor.

A Figura 3.23 a seguir mostra os patamares de temperatura necessários para cada tipo de tratamento térmico.

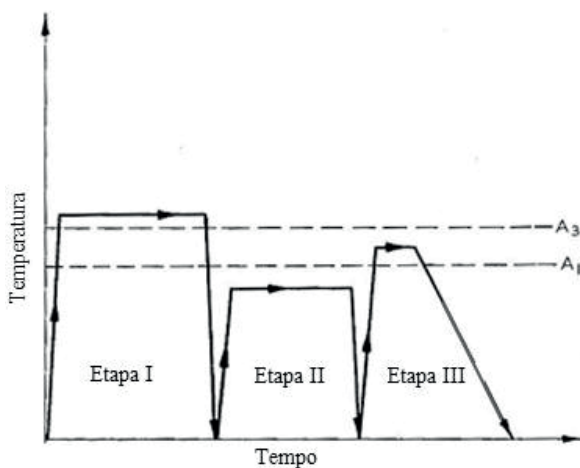
Figura 3.23 | Patamares de temperatura para diversos tipos de tratamento térmico em soldas de aço



Fonte: elaborada pelo autor.

É importante saber que todo tratamento térmico obedece a um ciclo de aquecimento e resfriamento previamente estabelecido para que seja possível acompanhar sua realização ao longo do tempo, como mostra a Figura 3.24.

Figura 3.24 | Ciclo de um tratamento térmico



Fonte: <<https://goo.gl/o48V1A>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

A Figura 3.24 ilustra um tratamento térmico de três ciclos de aquecimento e resfriamento (etapas I, II e III). O número de ciclos (etapas) depende do objetivo que se quer alcançar em termos de propriedades mecânicas do cordão de solda. Observe no gráfico da Figura 3.24 que a linha de temperatura A1 é temperatura de transformação eutetoide (do diagrama Fe-C), que corresponde a 720°C , em que se observa a reação $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$; a linha de temperatura A3 ocorre a cerca de 912°C , na qual, para o ferro puro, ocorre a reação $\gamma \rightarrow \alpha$.



Exemplificando

Avaliando uma amostra metalográfica de um cordão de solda, mostrada na Figura 3.25, observou-se a presença predominante de martensita. Esboce um possível ciclo de tratamento térmico para a obtenção dessa microestrutura.

Figura 3.25 | Microestrutura martensítica de uma solda de aço carbono

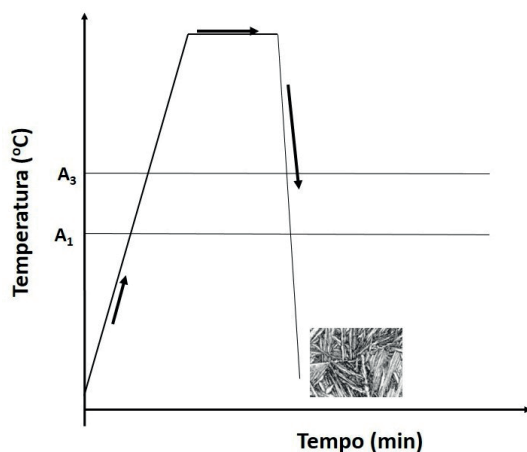


Fonte: <<https://goo.gl/cB6stww>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

Solução:

Por se tratar de uma estrutura martensítica, o tratamento térmico aplicado foi o de têmpera, que deve apresentar um ciclo de aquecimento-resfriamento próximo ao indicado na Figura 3.26 a seguir:

Figura 3.26 | Ciclo de tratamento térmico de têmpera em um aço



Fonte: elaborada pelo autor.

Observe que, após a permanência na temperatura de tratamento térmico (patamar), o resfriamento para a temperatura ambiente é rápido, ocorrendo em um tempo bastante curto, o que caracteriza a têmpera.

Análise macroestrutural de solda

A grande diferença entre análise microestrutural e análise macroestrutural é que na segunda análise não há a exigência de uso de microscópio ótico ou eletrônico; a análise é realizada a olho nu e pode trazer grandes revelações sobre a solda.

A preparação da amostra para análise (procedimentos de polimento e de ataque químico) é similar à preparação da amostra para análise micrográfica (que é a técnica de metalografia).

O uso de macrografia em soldagem tem as seguintes finalidades principais:

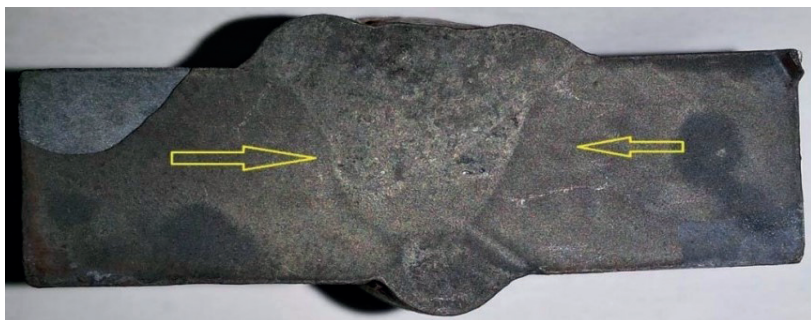
- **Análise da forma geométrica da solda:** é importante verificar se geometricamente a solda foi depositada de forma correta, sem desvios, garantindo, assim, que houve penetração suficiente durante a operação de soldagem.
- **Organização dos cordões de solda segundo cada passe de soldagem:** como nem sempre é possível realizar a união

com apenas um passe de solda, a análise da disposição dos cordões gerados por cada passe de solda é uma forma importante de se verificar a deposição do metal de solda e a possível ocorrência de defeitos.

- **Avaliação de defeitos possíveis de serem observados a olho nu:** defeitos de dimensões mais elevadas são facilmente detectados pela macrografia.
- **Avaliação da região de transição entre o metal de base e o metal de solda, ou seja, a ZTA (Zona Termicamente Afetada):** nesse caso, a avaliação permite vislumbrar qual região do metal base foi afetada pelo calor e avaliar também a dimensão da ZTA.

A Figura 3.27 mostra uma macrografia de solda e suas regiões características.

Figura 3.27 | Macrografia de uma amostra soldada



Fonte: <<https://goo.gl/p6XZDZ>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

As setas amarelas na imagem indicam a região da zona soldada revelada na macrografia.



Assimile

Em atividades de perícia de soldas é possível, por meio de amostras do material soldado, avaliar as características estruturais da solda. A análise microestrutural utiliza equipamentos de ampliação da imagem (microscópio ótico ou eletrônico) para estudar a microestrutura, e a análise macroestrutural também utiliza uma amostra do material

◀ soldado, porém a análise independe do uso de equipamentos e pode ser feita a olho nu. Em ambos, porém, há necessidade de se preparar a amostra por técnicas metalográficas apropriadas.

Sem medo de errar

Caro aluno, chegamos à fase da resolução da problematização desta seção. Lembre-se de que aqui você estudou os conceitos relacionados à microestrutura e macroestrutura do cordão de solda e os tipos de tratamentos possíveis de serem aplicados para melhorar as propriedades da solda.

Lembre-se de que a coordenação do seu curso resolveu desenvolver um projeto do carro de competição da categoria Baja SAE e, entusiasta que você é por competições automobilísticas, você se inscreveu e foi selecionado para fazer parte da equipe. Sua responsabilidade é cuidar do projeto da gaiola (estrutura tubular) do veículo, o que tem exigido de você uma série de habilidades e atitudes, tais como raciocínio crítico e capacidade de resolução de problemas, criatividade, curiosidade e um papel importante de liderança.

Durante a operação de soldagem da gaiola do Baja, observou-se que o cordão de solda apresentava trincas discretas devido a tensões residuais, que surgem na peça soldada em decorrência do fenômeno da dilatação térmica, causada pelo calor gerado durante o processo. Observou-se também uma certa porosidade no cordão de solda. Cabe à você determinar qual o tratamento térmico mais adequado para solucionar o problema em questão e esquematizar em um gráfico tempo (min) versus temperatura ($^{\circ}\text{C}$) as etapas desse tratamento térmico.

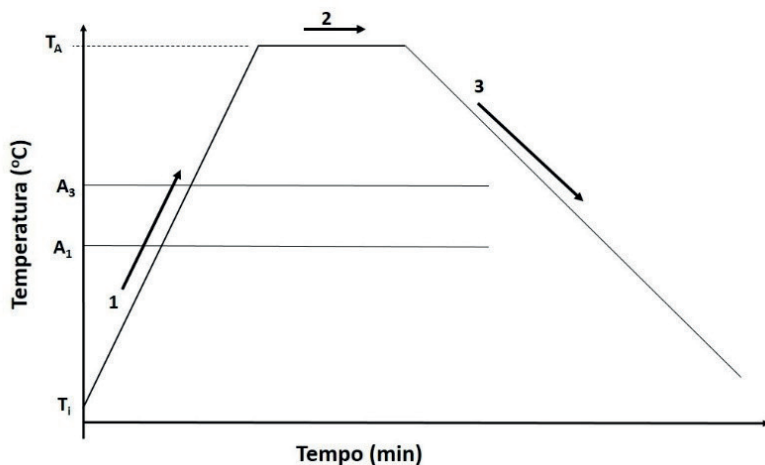
O fenômeno de ocorrência de trincas devido a tensões residuais surge, muito provavelmente, pelo fato de a solda ter sofrido um resfriamento sem o controle adequado. Ao se dilatar no aquecimento e, no resfriamento, ao se contrair, se a velocidade de resfriamento estiver elevada, não dará tempo de o material

retornar, de forma satisfatória, ao seu estado inicial. Assim, na contração súbita, as trincas surgem devido à concentração de tensões na região da solda, na qual a poça de fusão se solidificou.

A porosidade também pode ter sua ocorrência motivada por descontrole no resfriamento, pois bolhas internas, ainda da poça de fusão, podem ocasionar poros. Esse fenômeno também pode ocorrer pelo uso de parâmetros de soldagem inadequados: alta amperagem e velocidade de solda elevada.

Pode-se inferir que para solucionar esses dois problemas (defeitos) o melhor tratamento térmico seria o de recozimento, pois ele permitiria que a solda no patamar de tratamento recuperasse sua estrutura (eliminando as trincas e os poros) e, ao resfriar lentamente, o cordão de solda ficaria livre dos defeitos observados. As etapas do tratamento térmico são indicadas na Figura 3.28 a seguir.

Figura 3.28 | Etapas do tratamento térmico de recozimento na solda da gaiola do Baja SAE



Fonte: elaborada pelo autor.

As etapas mostradas na Figura 3.28 são as seguintes:

1. Aquecimento (lento) a partir da temperatura ambiente (T_i) até a temperatura de austenitização (T_A), em torno de $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Manter no patamar (2) por um tempo prolongado (o tempo vai depender do tamanho da peça a ser tratada).
3. Resfriar o metal a partir de T_A até T_i novamente, em uma velocidade de resfriamento lenta.

Note a importância desse trabalho de estudo, pois a solução dessa problematização envolveu todo o conhecimento adquirido nesta seção. Considere ainda que na vida profissional tais conteúdos devem ser plenamente dominados.

Antes de finalizar seu trabalho, há de se responder a duas questões impostas: você seria capaz de estimar qual a microestrutura do cordão de solda e da ZTA? Seria possível uma análise macroestrutural da solda?

Considerando que o material da gaiola do Baja é o aço carbono SAE 1020, após o tratamento térmico de recozimento, a microestrutura predominante é a de ferrita com uma pequena porcentagem de perlita.

Respondendo à questão “seria possível uma análise macroestrutural da solda?”, temos que sim, sem dúvida nenhuma seria possível a análise macroestrutural da solda. Haveria a necessidade de coletar uma amostra em corte do cordão de solda e aplicar as técnicas metalográficas pertinentes para se obter um perfil da macroestrutura da solda. Uma sugestão é consultar o livro, de Hubertus Colpaert, *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns* (2008), no qual é possível observar diversos exemplos de amostras metalográficas (micro e macro) inclusive de soldas.

Visto que o resultado da soldagem pode ser melhorado a partir da utilização de um tratamento térmico, quais seriam esses tratamentos térmicos?

Nesse caso, especificamente, não há outro tratamento térmico que dê bons resultados a não ser o de recozimento. Se fosse utilizada a normalização, por exemplo, o resfriamento da solda seria mais rápido que o do recozimento e haveria a possibilidade de se observar novas trincas na solda, que devem ser evitadas.

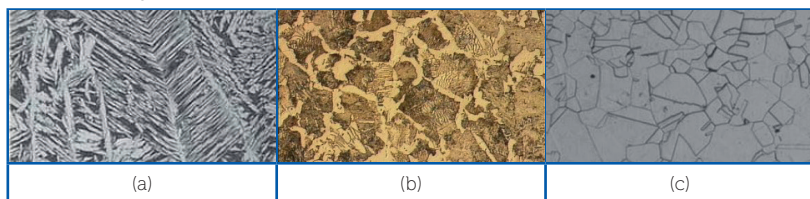
Cabe a você, agora, finalizar seu trabalho elaborando um relatório para ser apresentado à equipe na próxima reunião.

Avaliação da microestrutura de soldas

Descrição da situação-problema

Você trabalha em um laboratório de pesquisas que faz análise de materiais para diversos clientes como serviço terceirizado. Um dos clientes enviou para análise três amostras de soldas que, ao serem analisadas por metalografia, apresentaram as microestruturas indicadas na Figura 3.29. Caberá a você identificar cada uma das microestruturas apresentadas e indicar os possíveis tratamentos térmicos que cada solda sofreu.

Figura 3.29 | Microestruturas de soldas: (a) aço inoxidável duplex; (b) aço carbono comum; (c) aço inoxidável austenítico



Fonte: (a) <<https://goo.gl/pFN82z>>; (b) <<https://goo.gl/xnNKRc>>; (c) <<https://goo.gl/H5CFGo>>. Acessos em: 17 ago. 2018.

Resolução da situação-problema

De acordo com as microestruturas apresentadas e seus respectivos aços de origem, pode-se deduzir que:

1. Aço (a): aço inoxidável duplex, apresenta microestrutura acicular de característica martensítica, tendo sofrido, provavelmente, pela predominância dessa microestrutura, um tratamento térmico de têmpera.
2. Aço (b): aço carbono comum, apresenta uma microestrutura dupla composta de ferrita (fase clara) e perlita (fase mais escura). Por se tratar de um aço de baixo carbono, é possível que tenha sofrido um tratamento térmico de recozimento.
3. Aço (c): aço inoxidável austenítico apresenta uma matriz clara austenítica, típica desse tipo de aço, com granulação (grãos) de

contornos regulares. Há a possibilidade de esse aço ter sofrido o tratamento térmico de normalização ou uma têmpera (que preservou a estrutura austenítica da matriz).

Assim, com essa análise você determinou cada uma das microestruturas apresentadas e indicou os possíveis tratamentos térmicos que cada amostra de solda sofreu.

Faça valer a pena

1. A ZTA (Zona Termicamente Afetada) é uma região importante da solda e está em uma posição intermediária entre o cordão de solda e o metal base. Sendo assim, analise as afirmativas a seguir e as relações entre elas:

I – Podemos dizer que a ZTA trata-se de uma região na qual ocorre crescimento de grãos, além de ser uma região de esferoidização de carbonetos.

POIS:

II – Esses fenômenos ocorrem próximo à zona fronteira com o metal base.

De acordo com o texto-base, assinale a alternativa que contém a afirmação correta:

- a) As afirmativas I e II são verdadeiras, e a II justifica a I.
- b) A afirmativa I é verdadeira, mas a II é falsa.
- c) A afirmativa I é falsa, mas a II é verdadeira.
- d) As afirmativas I e II são falsas.
- e) As afirmativas I e II são verdadeiras, mas a II não é uma justificativa da primeira.

2. Os tratamentos térmicos (TT) são ciclos térmicos importantes no processo pós-soldagem visando regularizar a microestrutura da solda. Dos vários TTs possíveis, temos os seguintes:

I – Revenimento.

II – Solubilização.

III – Alívio de tensões.

IV – Normalização.

Considere as seguintes características dos TTs:

A – Conduz a um cordão de solda uniforme com boas possibilidades de não apresentar tensões residuais.

B – Leva à diminuição da dureza do cordão de solda e é realizado entre 400 °C e 650 °C.

C – Leva à diluição de precipitados que, se presentes, comprometem a qualidade do cordão de solda.

D – É realizado abaixo da temperatura crítica de mudança de fase, e o tempo e temperatura de tratamento dependem da espessura da chapa soldada.

Assinale a alternativa que relaciona de forma correta os tratamentos térmicos de I a IV com as características de A a D.

a) I – A; II – D; III – C; IV – B.

b) I – C; II – A; III – D; IV – B.

c) I – D; II – B; III – A; IV – C.

d) I – B; II – A; III – D; IV – C.

e) I – B; II – C; III – D; IV – A.

3. Em soldagem, aspectos relacionados à microestrutura e macroestrutura da solda são muito estudados para avaliar e buscar melhorias.

Com base nisso, considere as seguintes sentenças e julgue-as verdadeiras (V) ou falsas (F).

I – Uma das principais finalidades da metalografia em soldas é auxiliar na detecção de defeitos que podem ser avaliados a olho nu e quantificados por metalografia quantitativa.

II – Os tratamentos térmicos são formas de modificar as microestruturas das soldas sem alterar suas propriedades mecânicas.

III – A ZTA se caracteriza, entre outras coisas, por ser uma região de transformação de fases intensas, pois o calor que a afeta tem potencial para realizar essas alterações.

IV – Por apresentarem diferentes velocidades de resfriamento, a região do metal de solda e a ZTA têm microestruturas diferentes nas duas regiões.

Com base na sequência de valores lógicos V (verdadeiro) e F (falso) das afirmações anteriores, marque a alternativa que contém a ordem correta:

a) I – F; II – V; III – V; IV – F.

d) I – V; II – V; III – V; IV – F.

b) I – F; II – F; III – V; IV – V.

e) I – V; II – V; III – F; IV – F.

c) I – V; II – F; III – F; IV – V.

Referências

AVENTA. **Conheça a diferença entre os processos TIG e MIG/MAG**. 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/7rRSNW>>. Acessado em: 26 jul. 2018.

BAJA-SAE. **Dúvida sobre RBSB 7**. Disponível em: <<https://goo.gl/BwBjeF>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

BALMER. **Apostila de treinamento TIG**. Disponível em: <<https://goo.gl/3Kj75U>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

BOXER SOLDAS. **Calculadoras para solda**. Disponível em: <<https://goo.gl/Qd8Ddc>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

CCM, CALDEN, METACRON. **Solda**. Disponível em: <<https://goo.gl/e4C31i>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

CONDOR. **Oxicorte**. Disponível em: <<https://goo.gl/hKUodV>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

DUTRA MÁQUINAS. [Imagem de maçarico de corte]. Disponível em: <<https://goo.gl/NEyT5f>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

ENGENHARIA MECÂNICA NA WEB. [Imagem de aço carbono comum]. 5 fev. 2010. Disponível em: <<https://goo.gl/xnNKRc>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

ESAB. **Processo de soldagem – TIG (GTAW)**. Disponível em: <<https://goo.gl/gohsHR>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

FEM-UNICAMP. **MR640 – conformação plástica dos metais**. Disponível em: <<https://goo.gl/147Tkg>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

FORTES, C. **Apostila de arames tubulares**. 2004. Disponível em: <<https://goo.gl/9hRmQe>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

_____. **Apostila de eletrodos revestidos**. 2005a. Disponível em: <<https://goo.gl/3x6f2r>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

_____. **Apostila de soldagem MIG/MAG**. 2005b. Disponível em: <<https://goo.gl/ubLbTY>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

_____. **Apostila de arco submerso**. 2005c. Disponível em: <<https://goo.gl/twHdvG>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

_____. **Apostila de metalurgia da soldagem**. 2005d. Disponível em: <<https://goo.gl/c8j7xe>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

FOUNDRYGATE. **Influências metalúrgicas no metal fundido**. Disponível em: <<https://goo.gl/VqrVdT>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

INFOSOLDA. **Automação em soldagem**. Disponível em: <<https://goo.gl/fz51WH>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

_____. **Processos com arame tubular** – parâmetros de soldagem. [1997a?]. Disponível em: <<https://goo.gl/zuyyfF>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

_____. **Processo com eletrodo revestido** – características do processo. [1997b?]. Disponível em: <<https://goo.gl/WJKw5p>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

KIMINAMI, C. S. et al. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

MACHADO, I. F. **Tratamento térmico e de superfície**. Poli-USP, São Paulo. Disponível em: <<https://goo.gl/Uw48YA>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

MORAIS, W. A. et al. **Caracterização e estudo das propriedades mecânicas de uma junta soldada**. Research Gate, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/cLb2No>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

PORTAL METÁLICA. **Soldagem com arame tubular**. Disponível em: <<https://goo.gl/WJtS1B>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

ROSADO, D. B. **Comparação do efeito da fragilização por hidrogênio em aços com resistência à tração acima de 1000 MPa**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/iUxEhP>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

SAULO ARAUJO. **Soldagem eletrodo revestido**. Disponível em: <<https://goo.gl/B4mXr5>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

VARGAS, A. C. et al. Estudio del desgaste y evaluación electroquímica de aleaciones FeMnAl y acero AISI 316 LVM en fluido biológico simulado. **Revista ION**, Bucaramanga, v. 25, n. spe., oct., 2012. Disponível em: <<https://goo.gl/1dPRwy>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

VASCONCELLOS, P. I. G. et al. Estudo da soldagem de tubos de aço inoxidável duplex e superduplex na posição 5G. **Soldag. insp. (Impr.)**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 191-199, jul./set. 2010. Disponível em: <<https://goo.gl/9Nrj99>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Blucher, 2015.

Processos não convencionais de soldagem

Convite ao estudo

Caríssimo aluno, você chegou à última unidade de ensino deste material, que trata dos “processos não convencionais de soldagem”. Esses tipos de soldagem são comuns nos diversos segmentos industriais e, portanto, estão presentes na nossa rotina em variados produtos fabricados pela indústria automotiva, pequenos objetos como joias, peças de equipamentos eletroeletrônicos, conexões de válvulas de gás encanado e de água, plataformas submarinas de extração de petróleo, gasodutos, dentre outros diversos produtos.

O intuito é conhecer os tipos, os processos, os parâmetros e as tecnologias utilizadas na soldagem não convencional. Aqui, estudaremos uma série de características afins a essas técnicas de soldagem que abrangem: soldagem por arco plasma (PAW), a laser, com feixe de elétrons, soldagem por eletroescória, por resistência e por indução, soldagem por difusão, por atrito (soldagem por fricção), brasagem, micro soldagem, soldagem submarina e conceitos gerais sobre os demais processos de soldagem (soldagem a frio, por aluminotermia, por explosão e por ultrassom).

Uma grande empresa utiliza diversos processos de soldagem não convencional na fabricação de seus produtos e encontra-se em fase de expansão, tanto no atendimento a um número maior de clientes quanto no crescimento do seu quadro de colaboradores. Você foi contratado recentemente como *trainee* para trabalhar com esses tipos de soldagem. Assim, você terá o desafio de trabalhar com soldagem a laser,

a arco plasma, solda a ponto por resistência e brasagem, entre outras, despertando cada vez mais sua curiosidade a respeito de cada processo. Finalizando, temos que os materiais que a empresa usa nos seus produtos acabados vão desde aços inoxidáveis a aços galvanizados, passando por ligas não ferrosas (cobre, por exemplo).

Nesse contexto, você terá grandes desafios e deverá aplicar todo o seu conhecimento de soldagem. Os principais desafios são: especificar um processo de soldagem para chapas finas de aço inoxidável dos tipos ferríticos, martensíticos e austeníticos; determinar os principais parâmetros de soldagem para chapas de aço galvanizado e, por fim, determinar o tipo de brasagem para efetuar a união de aço carbono com cobre em conexões de tubos.

Você ainda será instigado a responder uma série de questionamentos, tais como: quais tipos de consumíveis se deve usar em processos de soldagem não convencional? O que diferencia a soldagem por arco a plasma da solda por laser? A brasagem pode substituir quais processos na soldagem de aços galvanizados?

Tenha sempre em mente a importância do auto estudo para sua formação acadêmica e profissional. Bons estudos!

Seção 4.1

Características gerais dos processos não convencionais de soldagem I

Diálogo aberto

Caro aluno, seja bem-vindo a esta seção na qual você aprenderá sobre os processos não convencionais de usinagem, sendo que nesta seção você conhecerá a soldagem por arco plasma (PAW – *Plasma Arc Welding*), a soldagem a laser (LBW – *Laser Beam Welding*), a soldagem com feixe de elétrons (EBW – *Electron Beam Welding*) e a soldagem por eletroescória (ESW – *Electroslag Welding*).

Em termos práticos, cada um desses processos pode ser aplicado a uma gama de peças e produtos, como soldagem de ligas de titânio e materiais refratários pelo processo PAW, aplicações aeronáuticas que utilizam o processo EBW, peças da indústria eletroeletrônica pelo processo LBW e soldagem de topos de tubos e revestimento feitos pela solda ESW.

Considerando nosso contexto de aprendizagem, imagine que você foi contratado como *trainee* em uma grande empresa que utiliza diversos processos de soldagem não convencional na fabricação de seus produtos e que se encontra em fase de expansão. Assim, você terá o desafio de trabalhar com soldagem a laser, a arco plasma, solda a ponto por resistência e brasagem, entre outras, despertando cada vez mais sua curiosidade a respeito de cada processo. Os materiais que a empresa usa nos seus produtos acabados vão desde aços inoxidáveis a aços galvanizados, passando por ligas não ferrosas (cobre, por exemplo).

Neste contexto, cabe a você, com sua curiosidade característica, fazer um levantamento de qual processo é mais indicado, entre a soldagem a laser e a soldagem por arco plasma, para a soldagem de chapas extremamente finas de aço inoxidável. A empresa trabalha com aço inox dos tipos ferrítico, martensítico e austenítico.

Você terá ainda que decidir se o processo escolhido (laser ou arco plasma) será aplicado para todos os tipos de aço inox que

a empresa trabalha ou se haverá a necessidade de implementar os dois tipos de soldagem, de acordo com o tipo de aço. Escolhido(s) o(s) processo(s) a ser(em) utilizado(s), quais seriam os consumíveis utilizados? Você terá que justificar suas escolhas em um relatório a ser apresentado para sua gerência imediata.

Você seria capaz de identificar quais as diferenças (e particularidades) entre a solda por feixe de elétrons e a solda por eletroescória? Algum desses dois processos poderia ser aplicado para a solução desta problematização? Justifique.

Note que todos os conteúdos abordados nesta seção são fundamentais para a solução da problematização proposta e para a sua formação profissional.

Ao trabalho!

Não pode faltar

Processo de soldagem por arco plasma (PAW).

A soldagem por arco plasma, cuja nomenclatura em inglês é *Plasma Arc Welding* e sua sigla é PAW, trata-se de uma solda elétrica que faz uso de eletrodo de tungstênio, porém, é diferente da TIG. Nessa solda, a fusão do metal a ser soldado ocorre por um arco elétrico conhecido como “constritor”. O termo constritor vem do fato do arco gerado pelo eletrodo de tungstênio ter seu diâmetro restringido por um bocal pelo qual passam o eletrodo e o gás (geralmente argônio) na forma de um jato extremamente aquecido que forma o plasma. Nesse processo, utiliza-se ainda outro gás (de fonte externa) que tem a função de proteger a solda.

O gás argônio utilizado no jato tem alto potencial de ionização, condição muito favorável para a formação do plasma (que, na verdade, é um gás ionizado a altas temperaturas).

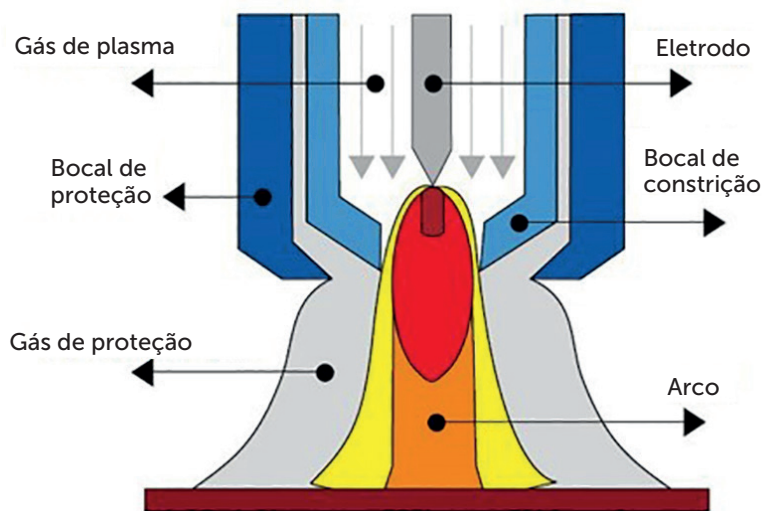
A soldagem por arco plasma é indicada para soldar aços carbono, aços de alta resistência e metais reativos, como, por exemplo, titânio e zircônio; sendo, portanto, muito eficaz para soldar chapas espessas.

O argônio apresenta a vantagem de ionizar-se com amperagem e voltagem baixas, no entanto, outros gases, tais como o Hélio puro ou misturado com Argônio, podem ser utilizados também, porém, essas duas opções exigem uma maior amperagem e uma tensão

maior. A mistura de Argônio com Hidrogênio é uma boa alternativa, pois o Hidrogênio atua como redutor e contribui para elevar a composição do arco, aumentando a velocidade de soldagem sem elevar a possibilidade de surgirem defeitos.

Como foi dito no início, esse processo faz uso de eletrodo de tungstênio, que não é igual ao processo TIG. As principais diferenças são as seguintes: tipo de tocha (no PAW é ionizada e no TIG não) e tensão do arco (no processo TIG constata-se um maior valor de tensão). A Figura 4.1 a seguir mostra um detalhe do bocal da soldagem arco plasma.

Figura 4.1 | Soldagem arco plasma



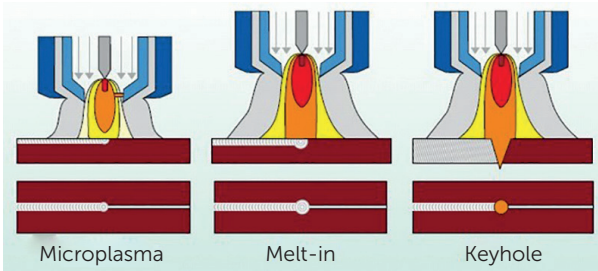
Fonte: <<http://www.metallica.com.br/images/stories/ld4198/vantagens-limites-solda1.jpg>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

A solda arco plasma pode, ainda, operar segundo três possibilidades:

- a) Microplasma.
- b) Melt-in.
- c) Keyhole.

Os aspectos esquemáticos de cada uma dessas três possibilidades são apresentados na Figura 4.2 a seguir.

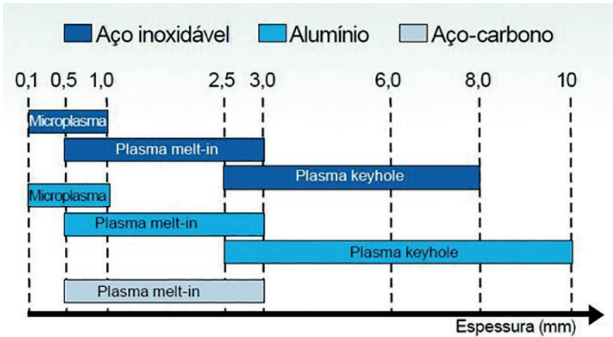
Figura 4.2 | Formas de operação das três possibilidades da solda arco plasma



Fonte: <<http://www.metalica.com.br/images/stories/ld4198/vantagens-limites-solda2.jpg>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

Dada a enorme concentração de calor gerado pelo gás ionizado (plasma), nesse processo é possível soldar, em um só passe, chapas de até 10 mm de espessura. A Figura 4.3 a seguir nos mostra as faixas de espessuras de chapas que são possíveis de se soldar com a solda arco plasma, considerando três diferentes materiais metálicos: aço inoxidável, alumínio e aço carbono. A figura mostra também os tipos possíveis de soldagem a arco plasma.

Figura 4.3 | Faixas de aplicação do arco plasma em chapas de três materiais diferentes.



Fonte: <<http://www.metalica.com.br/images/stories/ld4198/vantagens-limites-solda3.jpg>>. Acesso em: 22 jun. 2018.



Assimile

Embora tenham alguma similaridade, a solda arco plasma (PAW) e a solda TIG são processos diferentes de soldagem, sendo que cada um possui suas características peculiares. No entanto, há especialistas que consideram a solda PAW uma solda TIG aperfeiçoada, portanto, fique atento!

Segundo o Portal Metálica, a maior aplicação industrial do processo de soldagem a plasma reside na fabricação de equipamentos de aço inoxidáveis, soldagem de chapas de espessuras médias (de 3 a 8 mm) e das uniões que requerem cordões longos, como é o caso de tanques e reatores para a indústria química e de bebidas.

Soldagem a laser (LBW- *Laser Beam Welding*).

O mesmo laser usado em usinagem não convencional é recomendado para o processo de soldagem. O laser é um tipo de fonte de calor (luz) direcionada, originada a partir de uma fonte de radiação.

As grandes vantagens da solda a laser residem na alta velocidade de soldagem, inexistência de contato entre a fonte de calor e a peça soldada, praticamente não produz distorções na solda e, além disso, pelo fato do calor se concentrar (devido ao feixe), produz uma ZTA bem menor em comparação à produzida pelos demais processos convencionais. As soldas realizadas a laser geralmente são feitas em um único passe, não exigem metal de adição e são aplicáveis em soldagem de peças de espessura fina. Uma desvantagem que pode ser considerada significativa é a baixa eficiência, que é igual a 8%, apenas. Na soldagem a laser, os principais parâmetros a serem controlados são: potência e taxa de pulso (PRR – *Pulse Repetition Rate*).

Quando o laser é executado em modo de número de pulsos por segundo ou frequência de pulsos é conhecido como taxa de repetição de pulso (PRR). O termo PRR e a frequência de pulso são comumente utilizados. Em soldagem, isso tende a ocorrer a 10 Hz, em corte fina de 100 a 1000 Hz, e em marcação ou micromaquinação a 10,000 Hz. (AMADA, [s. d.], [s. p.]

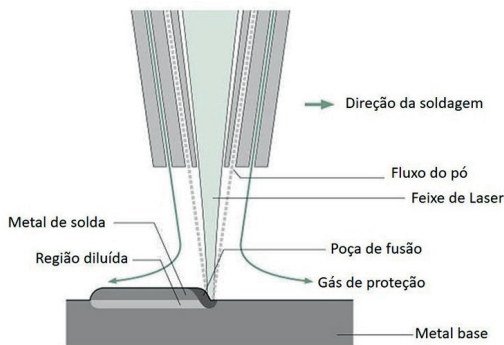


Os lasers de estado sólido, usados em processos de soldagem, podem operar no modo pulsado ou no modo conhecido como CW (onda contínua ou, no original em inglês, “*continuous wave*”).

As indústrias eletroeletrônica, aeroespacial e médica fazem uso da micro solda por laser operando no modo “por costura” ou, ainda, solda a ponto. Tais técnicas são amplamente aplicadas para soldagem de peças de pequenas dimensões.

Materiais possíveis de serem soldados a laser: aço inoxidável, aço carbono, ouro, prata, titânio, zinco, cobre, alumínio, dentre outros. A Figura 4.4 a seguir ilustra um dispositivo de soldagem a laser.

Figura 4.4 | Dispositivo de solda a laser



Fonte: <<http://www.xsecpo.biz/wp-content/uploads/2015/04/Laser-Metal-Deposition.jpg>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

O processo de soldagem a laser pode ser tratado também como um processo de deposição de metal por laser, como mostra a Figura 4.4. O processo de deposição a laser é conhecido por diversos nomes, tais como: Deposição de Metal a Laser (LMD), Deposição Direta de Metal (DMD), Deposição Direta a Laser (DLD), Revestimento a Laser (*Laser Cladding*), Soldagem por Deposição a Laser e Soldagem por Fusão de Pó.

As máquinas de deposição a laser são similares às máquinas de solda e corte a laser padrão, utilizando equipamentos padrão de manipulação CNC e fontes de laser. O tamanho da máquina depende do componente a ser reparado ou revestido. As fontes típicas de laser são o CO_2 com a fibra Yb e o disco Nd-YAG (acrônimo do inglês *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*, ou em tradução livre, disco de alumínio e ítrio dopado com neodímio).

A soldagem a laser tem a vantagem de poder ser facilmente automatizada, porém, tal automatização tem ainda um custo elevado (o que se torna uma desvantagem, em contraponto à vantagem citada). O fato de ser automatizada apresenta duas exigências para o processo funcionar de forma adequada: alta produção e mão de obra especializada.

Soldagem com feixe de elétrons (EBW).

A soldagem por feixe de elétrons (que no original em inglês é *“electron beam welding”* – EBW) consiste na emissão de um feixe estreito de elétrons de elevadíssima energia que tem o potencial

de fundir o material a ser soldado, sendo, portanto, considerada como uma solda por fusão. Em linhas gerais, a solda EBW emprega um fluxo denso de elétrons em alta velocidade para bombardear, aquecer e fundir os materiais que estão sendo unidos.

Dentre as soldas por fusão, esse processo tem um dos de custo mais elevados, porém, dada a qualidade final da solda, é muito utilizado na indústria aeronáutica, na qual os requisitos de segurança são elevados, ou seja, muito exigentes.

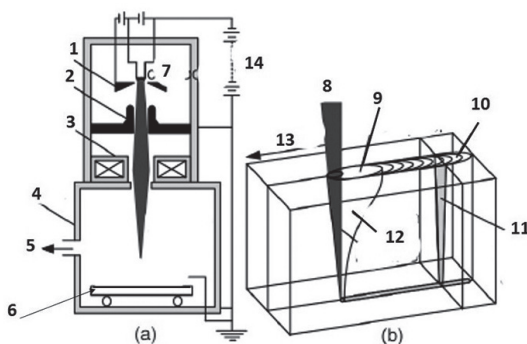
Esse tipo de solda tem uma peculiaridade que é a capacidade de soldar metais diferentes, possibilitando também a soldagem de materiais refratários (materiais resistentes ao calor, com ponto de fusão superior a **1700°C**). A amperagem e a voltagem variam, respectivamente, nas faixas de 50 a 1000 mA e 30 a 175 kV.

O aquecimento da zona soldada se deve a alta velocidade dos elétrons que chega a atingir de 30 a 70% da velocidade da luz (MECÂNICA INDUSTRIAL, [s.d.], [s.p.]).

Esse tipo de soldagem é indicado para unir juntas de espessura elevada, dado que se consegue atingir uma maior profundidade de penetração associada a uma largura mais ampla; isso em condições de soldagem a vácuo, que cria uma solda mais resistente e livre de distorções.

Um fator limitante à sua maior aplicação é a necessidade de operar sob vácuo (da ordem de 0,13 a 133 mPa), limitando também os tamanhos de peças possíveis de serem soldadas por esse processo. A Figura 4.5 a seguir ilustra o esquema do equipamento de soldagem por feixe de elétrons e uma peça soldada.

Figura 4.5 | Soldagem por feixe de elétrons: (a) processo; (b) detalhe da amostra soldada



Fonte: <<https://goo.gl/mzbwSu>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

Na Figura 4.5 temos a seguinte legenda: (1) eletrodo de polarização; (2) anodo; (3) bobina de focagem; (4) câmara de vácuo; (5) saída para bomba; (6) amostra a ser soldada; (7) catodo; (8) feixe de elétrons; (9) poça de fusão; (10) cordão de solda; (11) seção transversal da solda; (12) metal fundido; (13) direção da soldagem; (14) fonte de alta tensão.

Os parâmetros de soldagem desse processo que devem ser controlados/regulados são:

1. Tensão (V): em kV.
2. Amperagem (I) do feixe: mA.
3. Velocidade (v) de soldagem: mm/s.
4. Nível do vácuo: abaixo de 10 – 3 Torr (ou 1333 Pa – 400 Pa).
5. Diâmetro do feixe: mm.
6. Distância canhão-peça: mm.



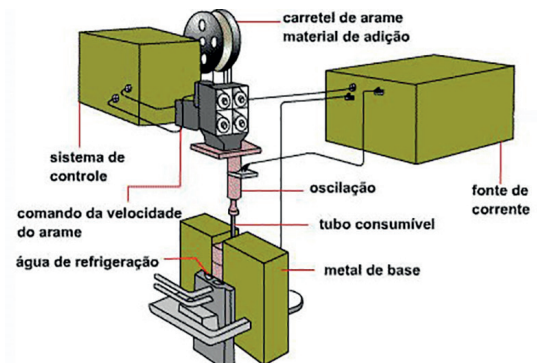
Refleta

Os equipamentos de solda a laser e de solda por feixe de elétrons possuem configurações muito próximas desses mesmos equipamentos usados para cortes de precisão na usinagem. Pense um pouco e reflita: o que de fato os habilita a serem equipamentos de soldagem também?

Soldagem por eletroescória (ESW).

A Figura 4.6 a seguir mostra o esquema de uma solda por eletroescória.

Figura 4.6: Solda por eletroescória



Fonte: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/ver_imagem.php?id_imagem=10367>. Acesso em 24 jun. 2018.

Na ilustração da Figura 4.6 temos o dispositivo completo da soldagem por eletroescória que, em linhas gerais, trata-se de um processo por fusão no qual há um depósito prévio de uma camada de fluxo granular que se funde com o calor da corrente do eletrodo, que é gerado pelo “efeito Joule”, juntamente com o metal de adição e a superfície a ser soldada (metal base).

Note que esse processo é parecido com o arco submerso, mas tem suas peculiaridades que o diferenciam, dentre os quais:

- O fluxo granular é depositado previamente no chanfro a ser soldado (no arco submerso, o fluxo é alimentado durante o processo de soldagem).
- A posição de soldagem é vertical ascendente e sem interrupção (no arco submerso, a posição horizontal é predominante).
- Há a existência de guias para o eletrodo e sapatas de refrigeração (que não se observa no arco submerso).

Segundo o Portal Infosolda ([s.d.], [s.p.]), as áreas de maior aplicação são: construções metálicas - soldagem de topo em chapas grossas; construção naval - soldagem de secções do navio e laterais de tanques; construção de recipientes e vasos de pressão - costuras longitudinais; técnica nuclear - partes de componentes para usinas nucleares; construção de máquinas - carcaças para turbinas, cilindros, eixos, bases para máquinas; construção de vagões ferroviários - superfícies de rolamento, jogos de rodas.

Principais parâmetros de soldagem:

- Tensões de trabalho: de 30 a 55 V;
- Corrente (I): CC ou CA e com o eletrodo no polo positivo, com a amperagem variando de um mínimo de 450 A a um máximo de 900 A.
- Altura da camada de escória: de 40 a 60 mm.
- Quantidade de arames utilizados.
 - a. Com oscilação: um arame para cada 150 mm de espessura de solda.
 - b. Sem oscilação: um arame para cada 65 mm de espessura.

Nota (1): Você deve visualizar a técnica da oscilação como sendo o movimento por meio do dispositivo que está acoplado ao

sistema de tracionar o arame. Ao soldar peças de grande espessura é aconselhável oscilar o arame por meios mecânicos, de tal forma que garanta a fusão junto aos contornos do chanfro. A oscilação pode variar no intervalo entre 8 e 40mm/s e aumentar com o aumento da espessura.

- Abertura do chanfro: entre 20 e 40 mm.
- “stick-out”: 50 a 75 mm.

Nota (2): “sick-out” é o termo utilizado para caracterizar a distância entre a guia e a poça de fusão e que define o comprimento livre do eletrodo.



Pesquise mais

Vimos que a soldagem por eletroescória é similar à soldagem por arco submerso. Agora, pesquise as principais diferenças e demais características da soldagem por eletroescória, aprofundando seus conhecimentos em:

CIMM. **Soldagem por Eletroescória. Para cada caso, uma soldagem específica.** 2010. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=807>. Acesso em: 24 jun. 2018.

INFOSOLDA. **Soldagem por eletroescória – características.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/205-soldagem-por-eletroescoria-caracteristicas.html>>. Acesso em: 24 jun. 2018. Boa pesquisa!

A Tabela 4.1 a seguir nos dá uma orientação dos principais parâmetros de soldagem desse processo.

Tabela 4.1| Parâmetros de soldagem para solda por eletroescória sem oscilação com um arame.

Diâmetro do arame (mm)	Veloc. De avanço do arame (m/min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Densidade de Corrente (A/mm²)	Taxa de deposição (Kg/h)
2,5	4 – 9	32 – 50	450 – 600	90 – 120	10 – 20
3,0	3 – 6		500 – 700	70 – 100	10 – 20
4,0	3 – 6		600 – 900	50 – 70	15 – 35

Fonte: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/205-soldagem-por-eletroescoria-caracteristicas.html>>. Acesso em: 24 jun. 2018.



Exemplificando

Suponha uma soldagem por eletroescória usando um arame de 3,0 mm de diâmetro. No painel do equipamento de soldagem há a indicação de uma amperagem de 600 A. Qual é a densidade de corrente (A/mm^2) durante esse processo?

Solução:

A densidade de corrente (φ) é dada pela relação I/A , em que I é a amperagem e A é a área de seção transversal do arame de soldagem.

Sendo assim, temos que:

$$\varphi = \frac{I}{A} = \frac{600}{\pi \cdot (1,5)^2} = 84,9 A/mm^2$$

Note que esse valor está compatível ao que é previsto na Tabela 4.1.

Sem medo de errar

Olá, caro aluno, vamos à resolução da problematização, lembrando que os conteúdos que foram abordados nesta seção, que englobam soldagem por arco plasma (PAW), a soldagem a laser (LBW), a soldagem com feixe de elétrons (EBW) e a soldagem por eletroescória (ESW) são suficientes para o desenvolvimento da solução que se busca. Todos os processos aqui citados e vistos são classificados como soldagens não convencionais.

Aqui você deverá desempenhar ao máximo sua capacidade de raciocínio, curiosidade, criatividade e capacidade de resolução de problemas.

Vamos, ainda, relembrar a contextualização desta unidade. Há uma grande empresa que utiliza diversos processos de soldagem não convencionais na fabricação de seus produtos e encontra-se em fase de expansão. Você foi contratado recentemente como *trainee* para trabalhar com esses tipos de soldagem; assim, terá o desafio de trabalhar com soldagem a laser, a arco plasma, solda a ponto por resistência e brasagem, entre outras, despertando cada vez mais sua curiosidade a respeito de cada processo. Os materiais que a empresa usa nos seus produtos acabados vão desde aços inoxidáveis a aços galvanizados, passando por ligas não ferrosas (cobre, por exemplo).

Neste contexto, cabe a você, com sua curiosidade característica, fazer um levantamento de qual processo, entre soldagem a laser e soldagem por arco plasma, é mais indicado para a soldagem de chapas extremamente finas de aço inoxidável. A empresa trabalha com aço inox dos tipos ferrítico, martensítico e austenítico.

Você terá ainda que decidir se o processo escolhido (laser ou arco plasma) será aplicado para todos os tipos de aço inox que a empresa trabalha ou se haverá a necessidade de implementar os dois tipos de soldagem, de acordo com o tipo de aço. Escolhido(s) o(s) processo(s) a ser(em) utilizado(s), quais seriam os consumíveis utilizados? Você terá que justificar suas escolhas em um relatório a ser apresentado para sua gerência imediata.

Você seria capaz de identificar quais as diferenças (e particularidades) entre a solda por feixe de elétrons e a solda por eletroescória? Algum desses dois processos poderia ser utilizado para solucionar esta problematização? Justifique.

Vamos então à resolução da problematização!

A questão é a seguinte: cabe a você fazer um levantamento de qual processo é mais indicado para a soldagem de chapas finas: soldagem a laser ou soldagem por arco plasma, e a empresa trabalha com aço inox dos tipos ferrítico, martensítico e austenítico.

Começemos pela solda a laser: você estudou que, dentre as grandes vantagens da solda a laser estão a alta velocidade de soldagem, a inexistência de contato entre a fonte de calor e a peça soldada, praticamente não produz distorções na solda e, além disso, o calor se concentra devido ao feixe, produz uma ZTA bem menor em comparação à produzida pelos demais processos convencionais. As soldas realizadas a laser geralmente são feitas em um único passe, não exige metal de adição e é aplicável em soldagem de peças de espessura fina (que é o tipo de chapa que a empresa trabalha). Além disso, os aços inoxidáveis estão entre os materiais que são possíveis de serem soldados a laser. Até aqui, temos dois pontos preciosos favoráveis à solda a laser.

Embora de custo elevado, a soldagem a laser tem a vantagem de poder ser facilmente automatizada, o que seria interessante para a empresa.

Agora, vamos ver a solda arco plasma: lembre-se que a solda arco plasma pode ser considerada uma solda TIG aperfeiçoada (porém, não é uma soldagem TIG propriamente dita). Faz uso de gás protetor (argônio) e eletrodo de tungstênio. Dada a enorme concentração de calor gerado pelo gás ionizado (plasma), nesse processo é possível soldar, em um só passe, chapas de até 10 mm de espessura.

Resgatando a Figura 4.3, veja que o processo de solda arco plasma, para aços inoxidáveis, chega a soldar chapas tão finas quanto uma de 0,10 mm de espessura. Finalmente, há de se considerar que a maior aplicação industrial do processo de soldagem a plasma reside na fabricação de equipamentos de aços inoxidáveis, com chapas de espessuras médias (3 a 8 mm).

Sendo assim, a escolha da solda arco plasma em detrimento da solda a laser é a alternativa mais econômica e viável para a empresa.

Escolhido(s) o(s) processo(s) a ser(em) utilizado(s), quais seriam os consumíveis utilizados? Nesse caso, como optou-se por utilizar a solda arco plasma, os principais consumíveis a serem utilizados são o gás ionizado (que pode ser o Argônio) e o gás de proteção (que poderá ser uma mistura de argônio com CO_2).

E ainda, será que você seria capaz de apontar quais as diferenças (e particularidades) entre a solda por feixe de elétrons e a solda por eletroescória? Algum desses dois processos poderia ser utilizado na solução desta problematização? Você terá que justificar.

Em se tratando de soldagem de chapas finas de aço inoxidável, já se elimina a eletroescória, que é indicada para chapas de maior espessura. Já a solda por feixe de elétrons tem a mesma particularidade da solda a laser, ou seja, um custo mais elevado, ainda deixando predominar a opção pela solda a arco plasma.

Veja, caro aluno, toda a gama de conhecimento que você fez uso para solucionar e concluir essa problematização, pois, no futuro, como profissional, você poderá enfrentar um desafio similar e, com certeza, solucioná-lo com o mesmo sucesso!

Ah, e não se esqueça que você terá que entregar toda essa sua análise em um relatório para a sua gerência na empresa.

Avançando na prática

Seleção de parâmetros de soldagem para eletroescória.

Descrição da situação-problema

Na empresa em que você trabalha, em uma soldagem por eletroescória, os parâmetros de soldagem são especificados conforme ilustra a Tabela 4.1 já apresentada nesta seção. Se em uma operação tradicional de soldagem costuma-se utilizar 550 A como corrente de solda e uma densidade de corrente de 95 A/mm^2 , qual seria o eletrodo mais indicado para tal operação baseando-se na Tabela 4.1? Você deverá justificar sua escolha para o setor de soldagem.

Tabela 4.1| Parâmetros de soldagem para solda por eletroescória sem oscilação com um arame

Diâmetro do arame (mm)	Veloc. De avanço do arame (m/min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Densidade de Corrente (A/mm^2)	Taxa de deposição (Kg/h)
2,5	4 – 9	32 – 50	450 – 600	90 – 120	10 – 20
3,0	3 – 6		500 – 700	70 – 100	10 – 20
4,0	3 – 6		600 – 900	50 – 70	15 – 35

Fonte: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/205-soldagem-por-eletroescoria-caracteristicas.html>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

Resolução da situação-problema

Considerando a amperagem aplicada de 550 A e a densidade de corrente de 95 A/mm^2 , teremos:

$$\varphi = \frac{I}{A}$$

E, sendo assim:

$$95 = \frac{550}{A}$$

Logo,

$$A = 5,78 \text{ mm}^2$$

Mas $A = \frac{\pi d^2}{4}$, ou seja:

$$5,78 = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ resultando em } d = 2,71 \text{ mm}.$$

Não existe na Tabela 4.1 um arame de $d = 2,71\text{mm}$. Há de se optar por $d = 2,5\text{mm}$ ou $d = 3,0\text{mm}$. Note que, para $d = 2,5\text{mm}$, o intervalo de amperagem é menor que para $d = 3,0\text{mm}$. Portanto, a solda sai a um custo menor (visto que o custo de eletricidade é alto) e a densidade de corrente de 95A/mm^2 está mais próxima do limite mínimo para $d = 2,5\text{mm}$ do que para $d = 3,0\text{mm}$.

Além dessas variáveis, note que para $d = 2,5\text{mm}$ a velocidade de soldagem é maior, logo, o tempo de processo deve ser menor e, novamente, menor deverá ser o custo se comparado com soldagem usando arame com $d = 3,0\text{mm}$.

Finalmente, temos que o uso de menor amperagem, menor tempo de soldagem com consequente menor custo de operação, leva a escolha do arame de $d = 2,5\text{mm}$.

Faça valer a pena

1. As nomenclaturas e siglas dos processos de soldagem são, na sua maioria, designados pela AWS – *American Welding Society*.

Dentre essas siglas e nomenclaturas, temos as apresentadas nos itens de (A) até (D):

- (A) PAW.
- (B) EBW.
- (C) LBW.
- (D) ESW.

Que representam os seguintes processos de soldagem apresentados nos itens de (I) até (IV). :

- (I) Soldagem por feixe de elétrons.
- (II) Soldagem por eletroescória.
- (III) Soldagem a laser.
- (IV) Soldagem a arco plasma.

Assinale a alternativa que relaciona de forma correta a sigla da AWS com o correspondente processo de soldagem.

- a) A – I; B – III; C – II; D – IV.
- b) A – II; B – I; C – III; D – IV.
- c) A – III; B – II; C – IV; D – I.

d) A – IV; B – I; C – III; D – II.

e) A – I; B – IV; C – II; D – III.

2. Os processos não convencionais de soldagem são similares à solda por fusão e apresentam algumas características equiparadas aos processos ditos convencionais.

Sendo assim, considere as seguintes sentenças e julgue-as verdadeiras (V) ou falsas (F):

(I) Na solda a laser, por ser um processo que envolve uma fonte de calor concentrada (feixe de luz), dispensa-se o uso de fluxo e gás de proteção.

(II) Na solda arco plasma, utiliza-se dois gases: um gás ionizado interno (que forma o plasma) e um gás de proteção (alimentado externamente).

(III) A solda por feixe de elétrons opera sob vácuo, dispensando o uso de fluxo e gás de proteção.

(IV) A solda por eletroescória faz uso de fluxo de proteção (fundente) e pode operar com mais de um arame (metal de preenchimento).

Com base na sequência de valores lógicos V e F das afirmações anteriores, marque a alternativa que contém a ordem correta:

a) I – F; II – F; III – V; IV – V.

b) I – F; II – V; III – V; IV – V.

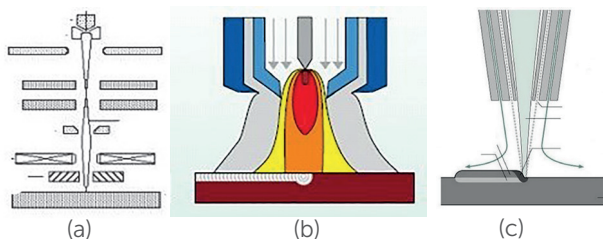
c) I – V; II – V; III – V; IV – F.

d) I – V; II – V; III – F; IV – F.

e) I – V; II – F; III – V; IV – V.

3. Os processos de soldagem não convencionais apresentam equipamentos e dispositivos de configuração mais complexos que as dos processos convencionais, o que contribui para encarecer tais processos. Vejamos três configurações básicas de soldagem não convencional na Figura 4.7:

Figura 4.7 | Configurações básicas de alguns processos de soldagem não convencional.



Fontes: adaptada de Infosolda; <<https://goo.gl/buXdro>>; <<https://goo.gl/uyk7Zd>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

Assinale a alternativa que corresponde corretamente a cada um dos processos de soldagem indicados na figura do texto-base, na ordem apresentada.

- a) EBW – LBW – PAW.
- b) PAW – LBW – EBW.
- c) ESW – EBW – LBW.
- d) EBW – PAW – LBW.
- e) LBW – PAW – EBW.

Seção 4.2

Características gerais dos processos não convencionais de soldagem II

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção iremos estudar os processos não convencionais de soldagem, dentre eles: solda por resistência a ponto, solda por indução, por difusão e por fricção. Embora ditos “não convencionais”, são amplamente utilizados nas indústrias das mais diversas áreas de manufatura. Para você ter uma ideia das aplicações rotineiras desses processos, as indústrias automobilística, naval e aeronáutica soldam muitas chapas que compõem seus produtos com solda a ponto, predominantemente em linhas automatizadas. Por sua vez, a soldagem por indução é fundamental para unir metais diferentes (aço e cobre, por exemplo), sendo, portanto, muito utilizada na fabricação de conexões de válvulas hidráulicas.

Dentro do nosso contexto de aprendizagem, você trabalha em uma grande empresa que utiliza diversos processos de soldagem não convencionais na fabricação de seus produtos e encontra-se em fase de expansão. Assim, você terá o desafio de trabalhar com soldagem a laser, a arco plasma, solda a ponto por resistência e brasagem, entre outras, despertando cada vez mais sua curiosidade a respeito de cada processo. Os materiais que a empresa usa nos seus produtos acabados vão desde aços inoxidáveis a aços galvanizados, passando por ligas não ferrosas.

Nesse contexto, você será desafiado a determinar os principais parâmetros de soldagem para chapas. Considere, portanto, que uma das chapas usadas na empresa de soldagem seja de aço galvanizado (a mesma utilizada na indústria automobilística). Essas chapas são soldadas por resistência a ponto. Dentro da nossa rotina, a solda por resistência se faz presente em diversas situações do nosso cotidiano, pois sem ela seria difícil soldar peças de circuitos eletrônicos, chapas de espessura fina utilizadas na indústria automobilística, entre outras.

No desafio desta seção, aguçando a curiosidade, você deve determinar alguns dos parâmetros de soldagem importantes para

realizar a soldagem de chapas de aço galvanizado de espessura de 2,0 mm, a fim de ajustar um novo equipamento que será adquirido e que realiza soldagem a ponto por resistência. Qual é o diâmetro do ponto de solda? Qual é o diâmetro do eletrodo a ser utilizado? Qual é o afastamento entre os pontos de solda?

Além disso, seria possível realizar a solda neste aço galvanizado pelos processos de eletroescória ou por feixes de elétrons? Justifique a sua resposta. E por solda a laser, seria possível? Quais os fatores limitantes.

Uma vez determinados e confirmados os parâmetros de solda aqui exigidos, você deverá apresentar suas conclusões em um relatório endereçado a sua chefia imediata.

Note, caro aluno, que todo o conteúdo abordado nesta seção é indispensável para que você consiga solucionar esta problematização, além de ser importante para a sua formação profissional, tornando-o apto a solucionar questões relacionadas ao processo de soldagem não convencional. Ao trabalho!

Não pode faltar

Soldagem por resistência

O processo de soldagem por resistência é um tipo de solda que, por meio do calor gerado eletricamente, associado a uma aplicação de pressão, realiza a união (junção) de dois materiais.

Os equipamentos de soldagem por resistência possuem eletrodos de cobre (condutor de corrente que gera o calor). Tais eletrodos são do tipo não consumíveis, pois não se desgastam durante a operação, mas se desgastam com o tempo devido ao uso intenso (portanto, o eletrodo tem uma vida útil).

Sendo assim, com o desgaste provocado pelo uso ao longo do tempo, observa-se um aumento na área de contato da face da ponta do eletrodo com a peça, provocando perdas indesejáveis no processo, tais como diminuição da qualidade da solda, exigindo a substituição do eletrodo. Apesar do desgaste, é possível "tentar" recuperar o eletrodo, mais especificamente a sua ponta, porém, neste caso, temos a diminuição da área de contato, que provoca perdas no processo, pois quanto menor for a área de contato, menor será o aquecimento e, finalmente, menor será a qualidade

da solda. Há de se constatar os seguintes fatos: no primeiro caso (aumento da área de contato) ocorre uma diminuição da densidade superficial de corrente, diminuindo o rendimento do processo, e no segundo caso (diminuição da área de contato) haverá aumento da densidade superficial de corrente, provocando sobreaquecimento do eletrodo e consequente diminuição da sua vida útil.

A quantidade de calor (Q) gerada no processo pode ser calculada pela Lei de Joule, segundo a expressão: $Q = KRI^2t$, em que K é uma constante de proporcionalidade, R é a resistência (Ohm), I é a amperagem (A) e t é o tempo (s) (BRACARENSE, 2000).

As variáveis fundamentais desse processo são as seguintes:

1. **Aquecimento:** a temperatura no núcleo da solda deve alcançar valores próximo a **1300°C** (para fundir o material a ser soldado), mas não deve exceder **900°C** na superfície de contato da peça com o eletrodo.
2. **Tempo:** é a variável relacionada para a corrente fluir e realizar a solda. O tamanho do botão de solda é diretamente proporcional ao tempo de fluência da corrente. Entenda que botão de solda é a região da solda marcada pelo contato do eletrodo com a peça.
3. **Pressão:** é aquela de contato entre as chapas pressionadas pelo eletrodo, que deve ser controlada para evitar deformação do eletrodo.

Além dessas variáveis de soldagem, deve ser especificado o diâmetro do eletrodo (D_e) que deve ser 1,60 mm maior que o diâmetro do ponto de solda (d), que é calculado por:

$$d = 5 \cdot \sqrt{S} \quad (I)$$

Ou

$$d = 2,5 + 2S \quad (II)$$

Em que d é o diâmetro do ponto de solda (mm) e S é a espessura da chapa em (mm).

Os resultados das duas equações são semelhantes, porém, caso os resultados sejam muito diferentes, deve-se usar somente a equação (I), de acordo com Wainer (2015). Assim, finalmente, temos que diâmetro do eletrodo é dado por:

$$D_e = 1,6 + d$$

Na solda a ponto, há de se respeitar uma distância mínima entre os pontos de soldagem. Essa distância pode ser calculada pela relação: $e = 2,5.S$, em que e é a distância mínima entre os pontos de solda em [mm] e S é a espessura das chapas, também em [mm].



Exemplificando

Um determinado setor de soldagem de uma indústria automobilística realiza soldas por resistência de chapas de 0,5 mm e 0,8 mm. Quais diâmetros de pontos de solda são esperados para cada chapa e quais os diâmetros de eletrodos a serem utilizados?

Solução:

(i) Para a chapa de 0,5 mm (fazendo uso das expressões I e II, respectivamente):

$$d_{0,5} = 5 \cdot \sqrt{0,5} = 3,53mm$$

Ou, também,

$$d_{0,5} = 2,5 + 2 \cdot 0,5 = 3,5mm$$

Portanto, podemos adotar $d_{0,5} = 3,5mm$, o que nos leva a um eletrodo de diâmetro igual a:

$$D_e = 1,6 + d_{0,5} = 1,6 + 3,5 = 5,1mm$$

(ii) Para a chapa de 0,8mm (fazendo uso das expressões I e II, respectivamente):

$$d_{0,8} = 5 \cdot \sqrt{0,8} = 4,47mm$$

Ou, também,

$$d_{0,8} = 2,5 + 2 \cdot 0,8 = 4,10mm$$

Nessa situação, deve-se adotar o resultado da equação (II), ou seja:

$$d_{0,8} = 4,47mm$$

Assim, $D_e = 1,6 + 4,47 = 6,07mm$

Conclui-se, portanto, que, para a chapa de espessura 0,5 mm, temos que o diâmetro da solda será de $d_{0,5} = 3,5mm$ e o diâmetro do eletrodo será de $D_e = 5,1mm$. Para a chapa de espessura 0,8 mm, temos que o diâmetro da solda será de $d_{0,8} = 4,47mm$ e o diâmetro do eletrodo será de $D_e = 6,07mm$.

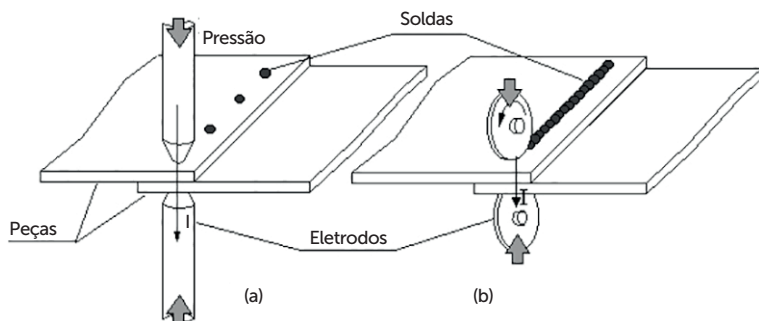
Existem quatro tipos de soldagem por resistência (INFOSOLDA, [s.d.]):

1. Soldagem por pontos.
2. Soldagem por projeção.
3. Soldagem por costura.
4. Soldagem de topo.

Vamos ver cada uma delas:

1. Soldagem por pontos: é um tipo de soldagem no qual a corrente advinda do eletrodo fica concentrada em um ponto da junta. É possível unir as superfícies em um ou mais pontos. No ponto de aplicação da solda, há uma combinação de calor e pressão: o calor é devido à corrente elétrica e a pressão vem do contato da ponta do eletrodo com as partes soldadas. Chapas de até **1/8"** são facilmente soldadas por esse processo, porém, chapas mais espessas requerem equipamentos especiais. A Figura 4.8 ilustra o processo de soldagem por resistência a ponto.

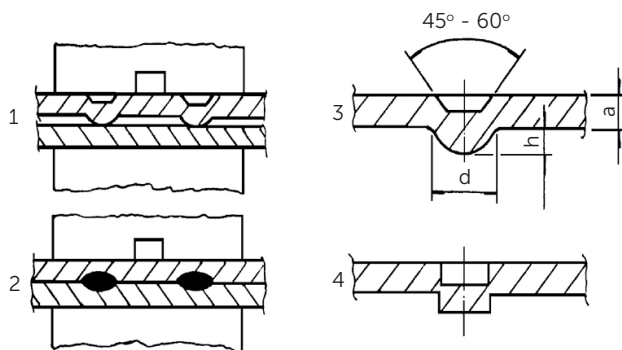
Figura 4.8 | (a) Soldagem por resistência a ponto (b) Soldagem por resistência por costura



Fonte: <<http://www.metalica.com.br/images/stories/artigos-tecnicos/soldagem/soldagem-4.gif>>. Acesso em 28 jun. 2018.

2. Soldagem por projeção (ou ressalto): nesse método, o fluxo de corrente e o calor são aplicados em um ponto ou em pontos pré-determinados. Esses pontos podem estar localizados em uma ou ambas as peças. Uma operação anterior ao processo de soldagem é exigida, pois as peças devem passar por algum tipo de processo de conformação mecânica (estampagem, forjamento, etc.) para que possam adquirir as formas das projeções que serão produzidas na soldagem. A Figura 4.9 ilustra essa variante do processo de solda por resistência.

Figura 4.9 | Soldagem por projeção



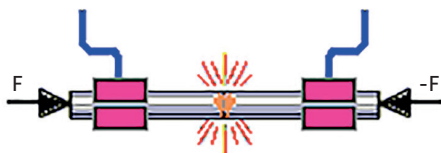
Fonte: <<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAABDd4AL-51.jpg>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

3. Soldagem por costura: A Figura 4.8 (b) ilustra esse processo, no qual se observa uma série de pontos sobrepostos. O processo utiliza eletrodos circulares (na forma de disco) ou um eletrodo circular e outro na forma de barra. A sequência de pontos de solda é realizada sem a retirada dos eletrodos (ou seja, sem remover o contato do eletrodo com a peça), porém, eles podem avançar de forma contínua ou intermitente. A fim de se produzir uma união satisfatória, é fundamental manter sob controle as seguintes variáveis: intensidade de corrente, duração (tempo), pressão e velocidade das peças ou dos eletrodos.

4. Soldagem de topo: nesse método de soldagem, ilustrado na Figura 4.10, a corrente elétrica flui por meio das faces das peças posicionadas topo a topo (ou face a face), e esta pode ser dividida em dois tipos: soldagem de topo por resistência pura e soldagem de topo por centelhamento. Na soldagem de topo pura, a junção é executada por toda a seção de contato das partes que serão soldadas, e as duas partes são comprimidas uma contra a outra, até que sejam fundidas pelo calor gerado pela passagem de corrente. Esse processo é muito aplicado para soldar arames, barras, chapas e tubos com até 15 mm de diâmetro. No segundo tipo, a junção é observada ao longo de toda a área de contato das partes a serem soldadas. Além disso, nesse processo, as áreas são afastadas, formando uma faixa, e, em seguida, são unidas repetidamente até que se atinja a temperatura de forjamento,

aplicando uma pressão para finalizar a solda. O processo por centelhamento é utilizado na soldagem de barras, tubos ou perfis (INFOSOLDA, 1997).

Figura 4.10 | Soldagem de topo



Fonte: adaptada de Netto (1999).



Pesquise mais

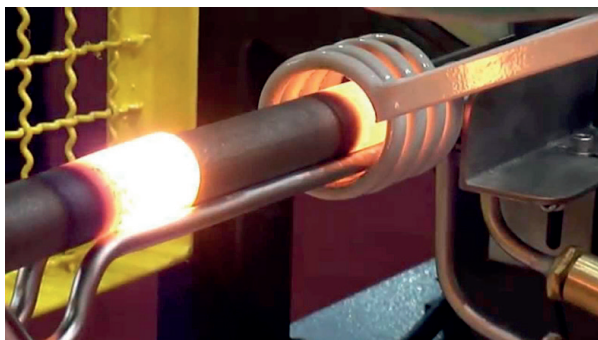
Você pode aprofundar seus conhecimentos sobre os equipamentos de soldagem por resistência estudando o capítulo 4 "Soldagem por resistência" do livro de Emilio Wainer, *Soldagem: processos e metalurgia*, páginas 235 a 238. Boa pesquisa!

Soldagem por indução

A soldagem por indução envolve o aquecimento das partes a serem unidas pelo processo de indução, como o próprio nome diz. Tal processo é composto por uma fonte de alimentação que converte a energia da rede em uma corrente alternada (portanto, trata-se de uma solda que opera com CA), transmitida para um cabeçote e bobina de indução, criando-se um campo eletromagnético dentro da bobina. A peça a ser soldada é colocada no interior da bobina e o campo magnético produzido induz uma corrente elétrica na peça de trabalho, que produz calor. Não há contato entre a bobina e a peça. O calor é gerado apenas pela corrente induzida que circula na peça que está sendo soldada.

Com esse processo, é possível soldar diversos materiais condutores, tais como: aço, cobre, alumínio ou bronze, ou um semicondutor, como carbono, grafite ou carboneto de silício. A Figura 4.11 a seguir ilustra a soldagem de barras por um processo de indução.

Figura 4.11 | Soldagem de barras por indução



Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=gL4fkmlhptA>>. Acesso em: 01 jul. 2018.

No caso de materiais não condutores, como, por exemplo, polímeros e vidros, utiliza-se um extensor condutor, normalmente de grafite, que transfere o calor para o material não condutor.

A faixa de temperatura de operação de um sistema de soldagem por indução vai desde **100°C** até **3000°C**, podendo ser utilizado em processos de aquecimento curtos que duram menos de meio segundo e em processos de aquecimento que podem durar meses (AMBRELL, [s.d.]).



Assimile

A assimilação do processo mostrado na ilustração da Figura 4.11 pode ser consolidada assistindo ao vídeo intitulado *Indução Térmica*, de apenas 1 minuto e 10 segundos, disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=gL4fkmlhptA>>. Acesso em: 29 jun. 2018. Vale a pena conferir!

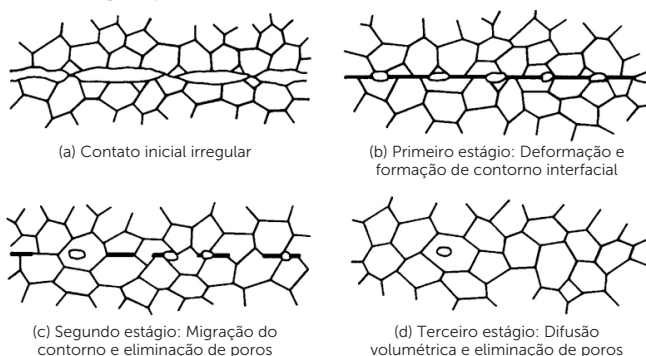
Soldagem por difusão.

Esse processo de soldagem, que faz uso de calor e pressão, fundamenta-se basicamente nas seguintes etapas, ilustradas na Figura 4.12 a seguir:

- a. Contato inicial irregular.
- b. Deformação e formação de um contorno interfacial (primeiro estágio).

- c. Migração do contorno e eliminação de poros (segundo estágio).
- d. Difusão volumétrica e eliminação de poros (terceiro e último estágio).

Figura 4.12 | Soldagem por difusão



Fonte: <http://www.infosolda.com.br/images/imagens-artigos/Art_corte/difusao.png>. Acesso em: 29 jun. 2018.

A soldagem por difusão é aplicada para unir materiais iguais, materiais de composição química semelhante ou até mesmo materiais diferentes (aço e alumínio, por exemplo), porém, metálicos (GIMENES e TREMONTI, [s.d.]).

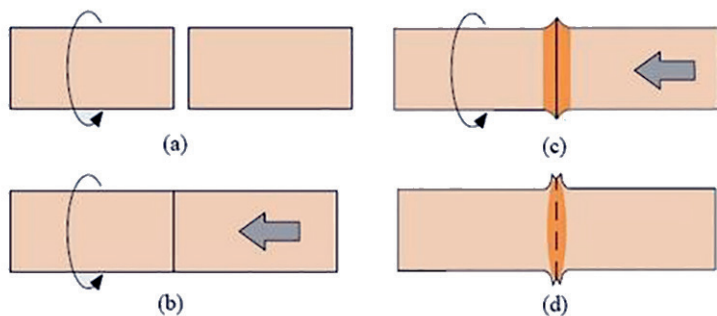
Os principais parâmetros de soldagem para esse processo são os seguintes:

1. **Temperatura e pressão:** a temperatura deve estar abaixo da linha *solidus* (cerca de $0,7.T_s$) ou acima da temperatura de recristalização da liga;
2. **Pressão de contato:** varia de 1,0 a $30N/m^2$ (1,0 a $30Pa$);
3. **Duração (tempo) de contato entre as partes:** pode ir de 10 minutos até horas, sendo que $T_s \propto \frac{1}{T}$; em que T_s é o tempo de soldagem e T é a Temperatura de Soldagem, ou seja, são variáveis inversamente proporcionais.
4. **Deformação das superfícies de contato;**
5. **Acabamento superficial:** rugosidade e limpeza (rugosidade de 1 a $6\mu m$);
6. **Atmosfera protetora:** vácuo (10^{-3} a $10^{-6}Torr$), ou gás de proteção (Hélio ou Argônio) ou banho de sal ($BaCl_2$) (GIMENES e TREMONTI, [s.d.]).

Soldagem por atrito (soldagem por fricção).

Neste tipo de soldagem pouco convencional, mas aplicável em diversas situações, o processo de união de duas peças acontece pelo atrito mútuo (ou seja, uma peça fricciona a outra), sem a utilização de eletrodo, sem material de preenchimento e sem fusão das partes. De acordo com a Figura 4.13, durante a operação desse tipo de soldagem, as peças são fixadas em um dispositivo rotativo e, ao aproximar-se e entrar em contato, as duas partes em rotação geram um calor elevado devido ao atrito e chegam a se fundir (no sentido de unir) uma a outra. Trata-se, portanto, de um processo mecânico de soldagem e não de um processo de fusão. Como não há fusão (no sentido de liquefazer), as características metalúrgicas dos materiais soldados tendem a permanecer inalteradas. Apesar de não haver fusão das partes soldadas, tal como acontece na soldagem convencional, há a formação de uma zona termicamente afetada (ZTA), semelhante aos processos de soldagem convencional.

Figura 4.13 | Soldagem por atrito ou fricção. Sequência de soldagem (a), (b), (c) e (d)



Fonte: <http://mmborges.com/processos/Uniao/uniao%20termica%20-%20soldagem_arquivos/image048.jpg>. Acesso em 29 jun. 2018.

A soldagem por fricção é usada, principalmente, para a união de peças de simetria cilíndrica, tais como tubos e barras. Observe na Figura 4.13 a sequência desse processo de soldagem segundo o qual em (a) a peça é colocada em rotação; em (b) as duas partes se aproximam pela ação de uma força de compressão; em (c) inicia-se a soldagem e em (d) o processo de soldagem é concluído.

Uma observação interessante de se constatar neste tipo de soldagem é que, não havendo fusão das partes unidas e defeitos,

tais como porosidade, as fendas e trincas de solidificação não se apresentam. A soldagem por fricção produz uma baixa concentração de defeitos e é muito tolerante a variações nos parâmetros dimensionais e materiais.



Reflita

Na maioria dos processos de soldagem observa-se a fusão das partes unidas. Na soldagem por fricção isso não acontece. Sendo assim, mesmo havendo união entre as partes, você acha que a qualidade da solda por fricção é inferior à dos demais processos que você estudou até agora? Procure uma justificativa para sua resposta.

Sem medo de errar

Olá, caro aluno, vamos à solução do nosso desafio desta seção.

Vamos relembrar nosso contexto de aprendizagem, segundo o qual você trabalha em uma grande empresa que utiliza diversos processos de soldagem não convencionais na fabricação de seus produtos e encontra-se em fase de expansão. Assim, você terá o desafio de trabalhar com soldagem a laser, a arco plasma, solda a ponto por resistência e brasagem, entre outras, despertando cada vez mais sua curiosidade a respeito de cada processo. Os materiais que a empresa usa nos seus produtos acabados vão desde aços inoxidáveis a aços galvanizados, passando por ligas não ferrosas (cobre, por exemplo).

No desafio desta seção, aguçando a sua curiosidade e sua capacidade de resolução de problemas, você deve determinar alguns dos parâmetros de soldagem importantes para realizar a soldagem de chapas de aço galvanizado de espessura de 2,0 mm, a fim de ajustar um novo equipamento que será adquirido, que realiza soldagem por resistência a ponto. Qual é o diâmetro do ponto de solda? Qual é o diâmetro do eletrodo a ser utilizado? Qual é o afastamento entre os pontos de solda?

Além disso, seria possível realizar a solda nesse aço galvanizado pelos processos de eletroescória ou por feixes de elétrons? Por solda a laser, seria possível? Quais os fatores limitantes. Justifique a sua resposta.

Vamos à resolução do problema!

Para calcular o diâmetro do ponto de solda há duas expressões:

$$d = 5 \cdot \sqrt{S} \quad (\text{I})$$

ou

$$d = 2,5 + 2S \quad (\text{II})$$

Em que d é o diâmetro do ponto de solda (mm) e S é a espessura da chapa em (mm).

Fazendo uso da primeira, tem-se: $d = 5 \cdot \sqrt{S} = 5 \cdot \sqrt{2} = 7,07 \text{ mm}$

Fazendo uso da segunda relação: $d = 2,5 + 2S = 2,5 + 2 \cdot 2 = 6,5 \text{ mm}$

Dada a grande diferença de resultados, recomenda-se usar o resultado da primeira expressão, ou seja: $d = 7,07 \text{ mm}$.

Para se obter o diâmetro do eletrodo, a expressão $D_e = 1,6 + d$ nos dá essa possibilidade, pois o diâmetro do eletrodo (D_e) deve ser 1,60 mm maior que o diâmetro do ponto de solda.

Sendo assim: $D_e = 1,6 + d = 1,6 + 7,07 = 8,67 \text{ mm}$

Para calcular a distância mínima (e) entre os pontos de solda, podemos aplicar a relação: $e = 2,5 \cdot S$. Sendo assim: $e = 2,5 \cdot 2,0 = 5,0 \text{ mm}$.

Logo, os parâmetros de solda calculados até agora são os seguintes:

- Diâmetro do ponto de solda: 7,07 mm.
- Diâmetro do eletrodo: 8,67 mm.
- Distância entre os pontos de solda: 5,0 mm.

Deve-se observar que a chapa em questão tem 2,0 mm de espessura, logo, não é uma chapa muito fina, mas está dentro dos padrões de espessura de chapa, que pode ser soldada por resistência a ponto, pois temos que, para chapas de até $\frac{1"}{8} = 3,175 \text{ mm}$, o processo de solda a ponto é indicado.

Você ainda poderia questionar: seria possível fazer a solda neste aço galvanizado pelos processos de eletroescória ou por feixes de elétrons? Por solda a laser, seria possível? Quais os fatores limitantes?

Temos que, apesar da chapa não ser muito fina, a soldagem pelos processos propostos (eletroescória, por feixes de elétrons e por solda a laser), poderiam ser aplicados com exceção da eletroescória,

que é indicada para chapas de grandes espessuras. No entanto, seja por feixe de elétrons ou a laser, o custo seria mais elevado se comparado com a soldagem a pontos, logo, na comparação, ficam descartados também!

Com isso, você finaliza sua resolução da problematização que se apresentou. Lembre-se de encaminhar tais soluções e justificativas em um relatório para sua gerência.

Note, finalmente, que os conteúdos mobilizados nessa seção foram de vital importância para você chegar a solução desejada.

Continue seus estudos sobre processos de soldagem não convencionais, pois, além de serem importantes para sua formação acadêmica, poderão ser, também, para sua vida profissional, caso você venha a trabalhar na área de soldagem.

Avançando na prática

Soldagem de tubos de cobre.

Descrição da situação-problema

Uma determinada empresa de produtos de cobre atua na fabricação, instalação e manutenção de tubulações de cobre, dentre outros materiais. Em um projeto desenvolvido por essa empresa, a união de duas seções de uma tubulação de cobre, no interior da qual irá escoar um fluido, poderá ser realizada por indução ou por atrito. Considerando que cada seção da tubulação a ser unida tem 500 mm de comprimento, o tubo tem diâmetro 80 mm e espessura 10 mm e que a tubulação completa tem 5,0 metros de comprimento, você, que trabalha no setor de seleção de processos, deverá optar por um dos dois processos em questão.

Resolução da situação-problema

Para chegar a uma solução, você deverá analisar cada um dos processos aplicados a união desses tubos.

- a) **Soldagem por indução:** a solda por indução é ideal para soldar tubos, pois como não há contato entre a peça e a bobina, o calor provocado pelo aquecimento da bobina garante uma solda homogênea ao longo de toda a circunferência

(perímetro) da seção circular do tubo. O fator limitante é a espessura do tubo (10 mm). No entanto, há de se considerar que a solda por indução pode alcançar temperaturas de até 3000°C (o que não é o nosso caso, por se tratar de cobre), garantindo a soldagem de tubos com tal espessura.

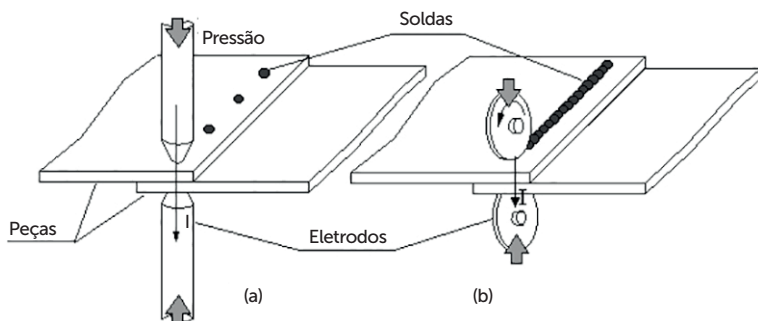
- b) Soldagem por atrito:** a solda por atrito requer a fixação das duas partes a serem soldadas em um dispositivo rotativo para que, no contato durante a rotação, seja promovido o aquecimento das partes por fricção entre elas. Assim, a soldagem de tubulação extensa por esse método torna-se inviável.

Concluindo, temos que a soldagem dos tubos de cobre de 500 mm de comprimento, 80 mm de diâmetro e 10 mm de espessura deve ser realizada por indução.

Faça valer a pena

- 1.** Os processos de soldagem classificados como não convencionais são amplamente utilizados nas indústrias metal-mecânica e eletrônica. Observe na Figura 4.8 a seguir dois modelos desse tipo de soldagem.

Figura 4.8 | Tipos de soldagem não convencional



Fonte: <<http://www.metalica.com.br/images/stories/artigos-tecnicos/soldagem/soldagem-4.gif>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

Considere as seguintes afirmativas sobre esses dois processos e julgue-as verdadeiras (V) ou falsas (F):

- (I) Em (a) temos a solda a ponto e em (b) a solda é chamada de “solda por filete”.
- (II) As duas barras representadas em (a) e os dois discos representados em (b) são tipos de eletrodos característicos desses tipos de soldagem.

(III) A união das chapas ocorre devido ao calor gerado pela corrente elétrica e a pressão vem do contato dos eletrodos com as partes soldadas.

(IV) Esses dois processos caracterizam-se pela fusão dos dois materiais e no segundo modelo (b) nota-se a deposição de metal de solda.

Com base na sequência de valores lógicos V e F das afirmações apresentadas no texto-base, marque a alternativa que contém a ordem correta:

- a) V – V – V – V.
- b) F – F – V – V.
- c) V – V – F – F.
- d) F – V – V – F.
- e) V – F – V – F.

2. Os processos de soldagem não convencionais apresentam características próprias que os distinguem entre si. Sendo assim, temos a seguinte afirmativa:

A soldagem _____ envolve o aquecimento das partes a serem unidas. Tal processo é composto por uma fonte de alimentação que converte a energia da rede numa corrente alternada; com isso, cria-se um campo eletromagnético. Não há contato entre o sistema de soldagem e a peça. O calor é gerado apenas pela corrente que circula na peça que está sendo soldada.

De acordo com a afirmativa do texto-base, assinale a alternativa correta que preenche adequadamente a lacuna existente no texto em destaque.

- a) por resistência.
- b) por difusão.
- c) por indução.
- d) por arco plasma.
- e) por projeção.

3. O diâmetro do ponto de solda (d) pode ser calculado por duas expressões diferentes que levam em consideração a espessura da chapa a ser soldada. Supondo que nos cálculos realizados uma expressão forneceu $d = d_1$ e a segunda expressão forneceu $d' = 1,5.d_1$ e, conseqüentemente, o diâmetro do eletrodo para d' é maior que o diâmetro para d , assim, e

também considerando uma amperagem de soldagem igual para os dois casos, optou-se pelo eletrodo de diâmetro maior.

Assinale a alternativa que melhor justifica tal escolha do diâmetro do eletrodo.

- a) Escolheu-se o eletrodo de diâmetro maior porque o desgaste do eletrodo é menor.
- b) Escolheu-se o eletrodo de diâmetro maior porque a densidade superficial de carga é maior.
- c) Escolheu-se o eletrodo de diâmetro errado, pois o certo seria usar o eletrodo de diâmetro menor.
- d) Escolheu-se o eletrodo de diâmetro maior porque este diminui os espaçamentos entre os pontos, o que é sempre desejável.
- e) Escolheu-se o eletrodo de diâmetro maior para se ter uma densidade superficial de carga menor, facilitando a soldagem.

Seção 4.3

Características gerais dos processos não convencionais de soldagem III

Diálogo aberto

Caro aluno, seja bem-vindo à última seção deste material, na qual você terá os seguintes conteúdos sobre soldagem não convencional: brasagem, micro soldagem, soldagem submarina e conceitos gerais sobre os demais processos de soldagem (soldagem a frio, por aluminotermia, por explosão e por ultrassom), encerrando o material desta disciplina!

Note que são conteúdos que podem passar despercebidos no nosso dia a dia, mas que rotineiramente estão presentes, seja na união de peças de cobre tubulares (que compõem, por exemplo, os tubos condutores de gases em compressores, que são aqueles que ficam na parte de trás das nossas geladeiras, ou para refrigerar um delicioso chope). Note também, por exemplo, que não haveria plataformas de petróleo se não houvesse a soldagem submarina. Veja como esses exemplos ilustram a importância de alguns desses processos de soldagem.

Dentro de um amplo contexto, lembre-se que uma grande empresa utiliza diversos processos de soldagem não convencionais na fabricação de seus produtos e encontra-se em fase de expansão. Você foi contratado recentemente para trabalhar com esses tipos de soldagem. Assim, você terá o desafio de trabalhar com soldagem a laser, a arco plasma, solda a ponto por resistência e brasagem, entre outras, despertando cada vez mais sua curiosidade a respeito de cada processo.

Os materiais que a empresa usa nos seus produtos acabados vão desde aços inoxidáveis a aços galvanizados, passando por ligas não ferrosas (cobre, por exemplo).

Aqui, nesta seção, você terá que determinar o tipo de brasagem para efetuar a união de aço carbono com cobre para a fabricação de conexões de tubos usados em válvulas reguladoras de vazão de gás industrial, pois esse é um produto novo que a empresa irá produzir em larga escala a fim de inseri-lo no mercado. A peça é tal que a

solda faz a união entre um tubo de aço carbono com um cotovelo de cobre usado em conexões de tubos, como mostra a Figura 4.14.

Tal peça será fabricada por meio de brasagem por chama, em forno ou por indução? Além da relação de equipamentos e consumíveis, quais devem ser os parâmetros mínimos de soldagem para cada uma das possibilidades? Assim, você deve indicar o mais adequado, usando sua curiosidade para desenvolver essa problematização.

Figura 4.14 | Peça a ser fabricada por brasagem



Fonte: <<http://www.metalbrazing.com.br/produtos/miniatura/aco-carbono-brasagem-1.jpg>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

A união entre o aço e o cobre poderia ter sido realizada com sucesso por outro processo que não a brasagem? Se sim, você acha que os resultados seriam melhores?

Os conteúdos mobilizados nesta última seção da disciplina fecham com chave de ouro os conhecimentos mínimos necessários para que você atue com destreza na área de soldagem.

Bom trabalho!

Não pode faltar

Brasagem

A brasagem é um processo de soldagem não convencional, embora amplamente aplicado, que é utilizado para unir duas peças do mesmo material ou mesmo de materiais diferentes, sem que ocorra a fusão dos mesmos. A união (soldagem) se dá pela fusão do material de adição que pode ser uma pasta ou um pó metálico.

A brasagem ou solda forte, como também é conhecida, ou ainda “*brazing*”, tem uma definição técnica da *American Welding Society* (AWS) que a define assim:



A brasagem reúne um grupo de processos de união que liga metais pelo aquecimento adequado e pelo uso de um metal de adição com temperatura de fusão mais baixa do que a temperatura "solidus" do metal de base; o metal de adição preenche a junta por capilaridade. Neste tipo de união, o metal de base nunca se funde e é este fato que diferencia a brasagem de outros processos de soldagem por fusão. (INFOSOLDA, [s.d.])

Para fazer uma brasagem pode-se utilizar três tipos de pastas de solda:

- **Pó** – é o tipo mais utilizado, que deve ser diluído em água até formar uma pasta que é aplicada com um pincel na peça previamente aquecida a ser soldada.
- **Varetas de solda revestida com pasta** – é um tipo de soldagem na qual tanto a vareta como a pasta de revestimento fundem e preenchem a região a ser soldada. A pasta se funde, penetrando na região de solda e fazendo a união das partes.
- **Pó obtido da vareta revestida** – trata-se de um pó (idêntico ao pó comum) obtido de uma vareta revestida que foi submergida (em água).

Para realizar uma boa brasagem, deve-se usar um maçarico a gás propano ou acetileno, fazendo um movimento constante da chama na região de conexão, isto é, de soldagem, promovendo um aquecimento uniforme da região. Uma vez aquecidas as partes, aplica-se a pasta e mantém-se o movimento da chama.

Se o material a ser soldado for cobre (Cu) não se deve aquecê-lo a temperaturas muito elevadas (próximas ao seu ponto de fusão) para evitar que haja modificações das propriedades do cobre, além de torná-lo poroso.

Concluída a soldagem, as partes unidas devem ser resfriadas em água fria e os resíduos da superfície devem ser removidos com uma escova metálica.

A Figura 4.15 a seguir ilustra uma brasagem sendo realizada

Figura 4.15 | Brasagem

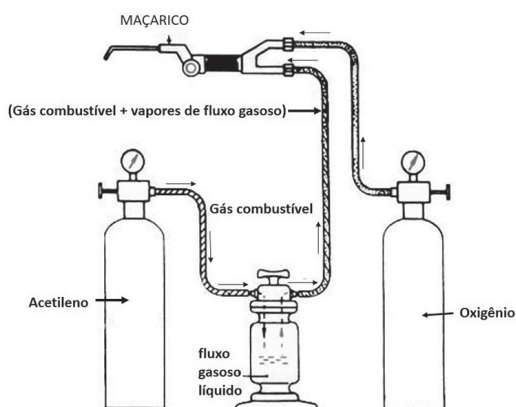


Fonte: <http://www.condornet.com.br/condor/por/conhecimento/images/brasagem_gr.gif>. Acesso em: 6 jul. 2018.

A brasagem é amplamente aplicada, na forma automatizada, na fabricação de equipamentos, tais como condicionadores de ar, geladeiras, radiadores, etc.

O dispositivo formado pelos gases e o maçarico utilizado no processo de soldagem por brasagem estão ilustrados na Figura 4.16, assemelhando-se ao equipamento utilizado para o oxi-gás.

Figura 4.16 | Equipamentos para solda por brasagem



Fonte: <http://www.gasflux.com.br/images/esquema_processo.jpg>. Acesso em: 6 jul. 2018.

A brasagem pode ser dividida nos seguintes tipos: brasagem por maçarico, por forno, por indução, por resistência, por imersão e por infravermelho (INFOSOLDA, [s.d.]). Vejamos com mais detalhes.

Brasagem por maçarico: é a forma de brasagem mais comum e que já vimos até aqui ao longo da exposição dos conteúdos e nas Figuras 4.15 e 4.16.



Embora um pouco similares em alguns aspectos, a brasagem por maçarico é diferente da soldagem oxi-gás, pois na brasagem não ocorre a fusão das partes soldadas (a união é devido à fusão da pasta adicionada), no entanto, na soldagem oxi-gás há a fusão do metal de adição e do metal base devido ao calor gerado pela chama do maçarico.

Brasagem por forno: neste processo é utilizado forno a gás, a óleo ou elétrico. Trata-se de uma técnica indicada em situações em que as peças a serem brasadas são montadas previamente, quando o metal de adição é colocado preliminarmente na junta e no caso de haver grande número de peças ou conjuntos pequenos a serem brasados, dentre outras situações menos comuns. Por utilizar forno, a tendência do custo da operação é mais elevada que no caso da brasagem por maçarico. No entanto, tal custo pode ser minimizado no caso de brasagem de grandes lotes de peças. Há de se levar em conta também que na brasagem por forno, há a necessidade de se manter uma atmosfera protetora para evitar oxidação das peças soldadas.

Brasagem por indução: embora guarde uma similaridade com a solda por indução (já estudada neste material), na brasagem por indução o calor é obtido por uma corrente elétrica alternada induzida nas peças a serem brasadas. As peças são colocadas dentro de uma espira refrigerada à água, em que passa uma corrente alternada ou próxima à espira. As peças não fazem parte do circuito elétrico. O equipamento é composto por uma fonte de energia elétrica e uma bobina refrigerada à água (INFOSOLDA, [s.d.]).

Brasagem por resistência: nesse processo, a geração de calor para a brasagem por resistência é resultado da circulação de uma corrente elétrica por meio dos eletrodos e da peça a ser brasada. Coloca-se previamente o metal de adição na junta ou pode adicioná-lo durante a operação de brasagem. O equipamento pode ser o mesmo utilizado na soldagem por resistência.

Brasagem por imersão: existem dois métodos: brasagem em banho de metal fundido e brasagem por imersão em banho químico. O primeiro é restrito a conjuntos pequenos, a partir da

utilização de um cadinho, geralmente feito de grafite, que é aquecido externamente até a temperatura necessária para manter o metal de adição no estado líquido; no segundo método utiliza-se um contêiner metálico ou cerâmico para o fluxo e um método de aquecimento para elevar a temperatura do fluxo até a temperatura de brasagem.

Brasagem por infravermelho: pode ser considerada uma forma de brasagem por forno, em que o calor é gerado por radiação invisível de alta intensidade por meio de lâmpadas de quartzo capazes de provocar uma energia radiante de até 5000 W (watt). Para concentrar a radiação no local da brasagem, usam-se refletores. O calor é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte (INFOSOLDA, [s.d.]). Ou seja, temos que:

$$Q \propto \frac{1}{d^2}$$



Pesquise mais

Para que você se aprofunde mais nos diversos tipos de brasagem, consulte o link abaixo que detalha e ilustra todos os processos. Boa pesquisa!

INFOSOLDA. **Brasagem – Processos**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/199-brasagem-processos.html>>. Acesso em: 7 jul. 2018.

Micro soldagem

A micro soldagem aplica-se a operações delicadas na união de metais com menos de 100 micrômetros de largura. Geralmente realizada sob um microscópio de precisão, o processo de soldagem micro é muito semelhante à soldagem normal, apenas em uma escala muito menor.

Há dois tipos básicos de micro soldagem: micro solda por resistência e micro solda a arco.

Micro solda por resistência: trata-se de um processo que não produz faísca e é aplicado para soldar diversos tipos de materiais, em particular, peças de pequenas dimensões, tais como fios e joias. A soldagem se dá pela ação de uma corrente elétrica que atua sobre as partes soldadas. Chapas planas de pequena espessura (lâminas) também podem ser soldadas por esse processo, que é muito similar a solda a ponto.

Micro soldagem a arco: faz uso de material de preenchimento aplicado no local da solda. Um eletrodo transporta a corrente elétrica que faz o aquecimento tanto do metal a ser soldado como do metal de enchimento. Após fusão, ambos se misturam formando um novo material. Esse processo é aplicado no reparo de moldes e ferramentas de metal de maneira precisa. A micro soldagem encontra grande aplicação na fabricação de placas de circuitos eletrônicos. Nos métodos mais tradicionais, ela pode ser realizada com a aplicação de laser ou com pulso de baixa intensidade e de duração na faixa de **1ms** (um milissegundo); lasers com pulsos curtos (10 a **100ns** - nanossegundos) aplicam-se a furação e corte de materiais (CIMM,s/d).

Soldagem submarina

A soldagem submarina ou subaquática, como o próprio nome diz, é aquela que é realizada submersa em água salgada (mar) ou em água doce (lagos, rios e barragens).

Existem, basicamente, dois tipos de processos de soldagem subaquática: solda molhada ou úmida e solda seca.

Solda molhada: é uma solda elétrica realizada com um eletrodo a prova de água ou a arco elétrico, no qual a água atua como condutora e o arco atua sobre a superfície do metal. A segurança do soldador-mergulhador está garantida porque o equipamento opera sob corrente contínua (CC). Esse tipo de solda é amplamente utilizado em estruturas *offshore* (ou seja, estruturas instaladas em alto mar).

Solda seca: tem a mesma segurança que a solda molhada, porém, nesse processo, a estrutura que será soldada é submergida e acoplada a outra parte que será unida. Há um dispositivo que se enche de ar e o soldador entra nesse ambiente, podendo, inclusive, retirar o capacete de mergulho e executar a soldagem. Na verdade, essa estrutura submergida (que pode ser uma parte ou mesmo uma plataforma completa) fica sob pressão atmosférica, facilitando o processo para o mergulhador-soldador, que, nesse caso, pode retirar o capacete de mergulho, e encontra maior facilidade de criar o isolamento elétrico, dentre outras vantagens.

A soldagem submarina é uma técnica extremamente útil em plataformas petrolíferas, em estaleiros (manutenção de

embarcações) e também em linhas submersas de gasodutos ou oleodutos. Dadas suas características singulares, trata-se de um processo de custo elevado.

Segundo a norma AWS D3.6M-99, a máxima profundidade que as soldagens molhadas podem ser realizadas é de 100 metros (SANTOS et al., 2015 e AWS, 1999).

Na soldagem subaquática, são feitas adaptações de soldas convencionais para que seja possível sua realização. Dentre as soldas que são adaptadas para a execução da soldagem subaquática temos a solda TIG, soldagem com eletrodo revestido, soldagem arco plasma, solda MIG e solda a arco elétrico.

Pode-se afirmar que um dos grandes problemas a serem superados nesse tipo de soldagem é que, como esta é realizada em um ambiente aquático de temperatura geralmente baixa, a solda se resfria rapidamente e as possibilidades de ocorrer trincas no cordão de solda e na zona termicamente afetada (ZTA) são grandes.

Conceitos gerais sobre os demais processos de soldagem (soldagem a frio, por aluminotermia, por explosão e por ultrassom).

As soldagens ditas não convencionais possuem diversas tipologias, além das que já estudamos, mas de uma forma geral, são aplicadas em situações muito especiais, nas quais os demais processos de soldagem são descartados. Vamos estudar algumas dessas soldas especiais:

Soldagem a frio: similar a um processo de colagem, essa solda também é conhecida como soldagem de pressão a frio, pois são unidas por meio de aplicação de pressão de elevada intensidade por matrizes ou cilindros, independentemente da existência (aplicação) de calor, como ocorre nas soldagens tradicionais.

Nesse processo, exige-se uma superfície muito plana, livre de qualquer impureza superficial; a ocorrência mínima de óxidos na superfície leva ao descarte da soldagem, pois a mesma ficará sujeita a falhas.

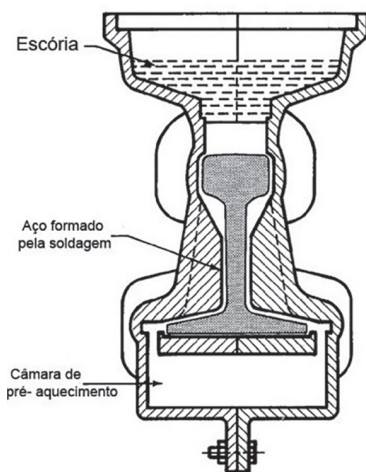
É possível, também, realizar a soldagem com pressões menores (deformando menos os materiais soldados) – porém, em tempos de contato maior – ou aquecer as superfícies a serem unidas para uma maior adesão.

Aluminotermia: é um processo que conduz à aglutinação de metais por meio de uma reação química, ou seja, na redução dos óxidos metálicos a partir do alumínio. Sua maior aplicação encontra-se na soldagem de trilhos ferroviários contínuos. O metrô e a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) mantêm uma equipe que trabalha com a aluminotermia na manutenção dos trilhos dessas composições.

A equação química que rege esse processo é a seguinte (SILVA, [s.d.]):
(óxido de metal + alumínio(pó) + óxido de alumínio + metal + calor)

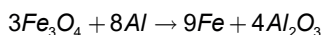
A Figura 4.17 a seguir mostra a aplicação da aluminotermia na soldagem de trilhos.

Figura 4.17 | Soldagem por aluminotermia em trilhos de trem



Fonte: <http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/Processo-de-soldagem-aluminotermico.pdf>. Acesso em 8 jul. 2018.

Pó de ignição: é um pó metálico usado para produzir calor suficiente para provocar a reação térmite, ou seja, aquela reação em que o alumínio metálico é oxidado pelo óxido de outro metal, geralmente o óxido de ferro. Vide a reação a seguir, como exemplo:



A reação acima é a mais utilizada como base para misturas em aluminotermia (SILVA, [s.d]).

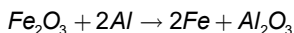


Exemplificando

Em uma operação de soldagem por aluminotermia, utilizou-se pó metálico de alumínio (Al) e óxido de ferro Fe_2O_3 , segundo a reação $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$. Qual o resultado esperado dessa reação?

Solução:

Fazendo o balanceamento químico, para o processo por aluminotermia o resultado seria o seguinte:



Portanto, resulta em outro metal (**Fe**) e outro óxido (Al_2O_3), que é o resultado esperado para esse processo de aluminotermia.

Soldagem por explosão: é um processo de soldagem que ocorre no estado sólido, em que ocorre uma explosão detonada de um explosivo, que tem tal intensidade capaz de lançar uma peça contra outra, unindo-as. A explosão provoca um tipo de decapagem superficial, limpando as superfícies a serem unidas e, ao mesmo tempo, comprimindo-as uma contra a outra.

Em linhas gerais, o processo de soldagem por explosão usa a detonação de cargas explosivas que aplicam a pressão necessária ao caldeamento das peças (INFOSOLDA, [s.d.]).

A soldagem por explosão pode ser realizada segundo duas composições possíveis: montagem em paralelo e montagem em ângulo.

As principais variáveis nesse tipo de soldagem são as seguintes: velocidade e ângulo de colisão, tipos de materiais, tipo e quantidade de explosivo e sua disposição.

Sua principal aplicação está no revestimento de chapas (processo conhecido como “*clad*”) de grandes dimensões (até 6,0 metros) de aços carbono com aços inoxidáveis, cobre com alumínio, etc.



Refleta

Na soldagem por explosão ocorre uma detonação de um explosivo, que tem intensidade capaz de lançar uma peça contra outra,

unindo-as. Esse impacto entre as partes não estaria deformando permanentemente os materiais, gerando defeitos de soldagem indesejados? Quais tipos de defeitos seriam esses?

Soldagem por ultrassom: trata-se de uma técnica de soldagem aplicada a polímeros termoplásticos, em que oscilações mecânicas provocam atrito no polímero, gerando calor que funde o material a ser soldado.

As indústrias das áreas automobilística, elétrica, de artigos para a medicina, de embalagens, de artigos de higiene e de fabricação de filtros, dentre outras, utilizam muito esse tipo de soldagem.

Além dos termoplásticos, esse processo é capaz de soldar metais não ferrosos tais como alumínio, cobre, níquel, e também materiais como vidro e cerâmica. Nesses casos, não há fusão dos materiais e a solda ocorre no estado sólido.

O processo de soldagem por ultrassom é realizado por meio de um gerador de energia elétrica de alta frequência que alimenta transdutores piezelétricos, responsáveis por transformar a energia elétrica em oscilações mecânicas ou vibrações, as quais são transmitidas à peça por meio de um sonotrodo. As vibrações e a força de compressão aplicadas à peça provocam um campo de tensões que, por sua vez, dá origem a uma deformação elastoplástica (INFOSOLDA, [s.d.]).

Sem medo de errar

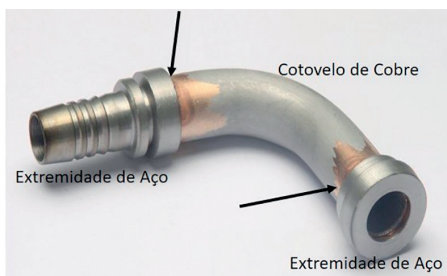
Caríssimo aluno, vamos à resolução do seu desafio desta seção.

Lembre-se que uma grande empresa utiliza diversos processos de soldagem não convencionais na fabricação de seus produtos e encontra-se em fase de expansão. Você foi contratado recentemente para trabalhar com esses tipos de soldagem e terá o desafio de trabalhar com soldagem a laser, a arco plasma, solda a ponto por resistência e brasagem, entre outras, despertando cada vez mais sua curiosidade a respeito de cada processo. Os materiais que a empresa usa nos seus produtos acabados vão desde aços inoxidáveis a aços galvanizados, passando por ligas não-ferrosas (cobre, por exemplo).

Você terá que determinar o tipo de brasagem para efetuar a união de aço carbono com cobre para a fabricação de conexões de tubos usados em válvulas reguladoras de vazão de gás industrial, pois esse é um produto novo que a empresa irá produzir em larga escala a fim de inseri-lo no mercado. A peça é tal que a solda faz a união entre um tubo de aço carbono com um cotovelo de cobre usado em conexões de tubos, como mostra a Figura 4.18.

Tal peça será fabricada por brasagem por chama, em forno ou por indução? Além da relação de equipamentos e consumíveis, quais devem ser os parâmetros mínimos de soldagem para cada uma das possibilidades? Assim, você deve indicar o mais adequado, usando sua curiosidade para desenvolver essa problematização.

Figura 4.18 | Peça a ser fabricada por brasagem



Fonte: adaptada de Brasagem (s.d.).

A união entre o aço e o cobre poderia ter sido realizada com sucesso por um processo diferente da brasagem? Se sim, você acha que os resultados seriam melhores?

Vamos à resolução da problematização proposta!

Essa peça foi manufaturada unindo aço carbono com cobre, e trata-se de uma conexão com um tipo de mangueira ou tubo para controle de vazão de gás industrial. A união ocorre nas regiões indicadas pelas setas.

Dos possíveis tipos de brasagem, a brasagem por maçarico seria a mais indicada, caso fosse uma peça única a ser fabricada, usando pasta de pó diluído em água. Por se tratar de cobre (Cu) não se deve aquecê-lo a temperaturas muito elevadas (próximas do seu ponto de fusão) para evitar que haja modificações das propriedades do cobre, além de torná-lo poroso. Além disso, concluída a soldagem,

as partes unidas devem ser resfriadas em água fria e os resíduos da superfície devem ser removidos com uma escova metálica.

No entanto, como a empresa irá fabricar essa peça em grande escala, a brasagem por forno torna-se a mais recomendada, pois a união das extremidades pode ser realizada previamente (sem solda), inserindo metal de adição (em pó) nas juntas, e a fusão (soldagem) das mesmas é realizada com a temperatura do forno elevada e a atmosfera controlada.

Podemos descartar o processo por indução, dado que os diâmetros nas juntas indicadas pelas setas são diferentes. Além disso, a forma geométrica da peça (cotovelo) impediria a passagem da peça pelas bobinas indutoras.

Considerando a opção por brasagem por maçarico, o equipamento mínimo necessário está ilustrado na Figura 4.16, incluindo os consumíveis gasosos acetileno e propano. Quanto à pasta, ela pode ser em pó, como já discutido aqui.

Por outro lado, caso a brasagem seja por forno, a opção é utilizar um forno elétrico que permita manter internamente uma atmosfera protetora para a solda.

Independentemente da brasagem ser por maçarico ou por forno, não temos informações suficientes para estabelecermos outros parâmetros de soldagem além dos que já citamos aqui, embora, tendo em mãos algum catálogo de fabricante, considerando que a solda é entre aço e cobre, poderíamos obter alguma informação adicional para realizar a soldagem. Por exemplo, pode ser utilizado o catálogo da empresa Brastak, intitulado *Catálogo Geral: Ligas especiais para Brasagem, Soldagem, Metalização e Revestimento*, disponível em: <<http://www.harris-brastak.com.br/downloads/catalogo-consumiveis.pdf>>. Acesso em: 8 jul. 2018.

Você ainda poderia questionar: a união entre o aço e o cobre poderia ter sido realizada com sucesso por um processo diferente da brasagem? Se sim, os resultados seriam melhores?

Dentre os processos de soldagem que estudamos nesta seção, não há outro processo mais indicado que a brasagem, porém, dentro do leque de processos que estudamos ao longo do nosso material didático, a aplicação de uma solda TIG nesta peça poderia produzir bons resultados. Embora tais resultados dependam muito da habilidade do soldador, utilizando-se a solda TIG observaríamos

um cordão de solda circundando a peça nos dois pontos de união, enquanto que, na brasagem, o pó se diluiria e proporcionaria um aspecto mais uniforme na região da soldagem. Além disso, por se tratar de uma união de aço com cobre, o aço tem uma temperatura de fusão bem superior à do cobre, fato esse que poderia comprometer a qualidade final da solda e da peça, mesmo sendo realizada com TIG.

Conclui-se, portanto, que, para a brasagem da peça em questão, podemos optar pela brasagem por maçarico no caso de uma única peça a ser soldada, ou pela brasagem por forno para uma produção em larga escala, como o exemplificado nessa problematização.

Avançando na prática

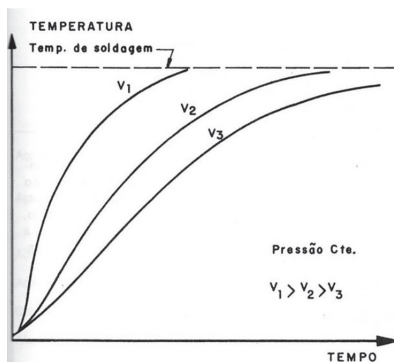
Avaliação do tamanho da ZTA em soldagem por atrito em função da velocidade de soldagem.

Descrição da situação-problema

A gerência do setor no qual você trabalha em uma grande empresa metalúrgica lhe repassou um relatório do setor de soldagem que mostra a influência da velocidade de soldagem por atrito no tempo de aquecimento das peças mantidas à pressão constante.

Com base no diagrama do relatório, indicado na Figura 4.19 a seguir, seu chefe lhe pediu para fazer uma análise/estimativa comparativa do tamanho da ZTA para cada situação de soldagem apresentada.

Figura 4.19 | Gráfico velocidade de soldagem em função do tempo de aquecimento da peça para pressão constante



Fonte: Wainer (2015, p. 323).

Resolução da situação-problema

Vamos lá, caro aluno. Analisando o gráfico apresentado na Figura 4.19, observa-se claramente que quanto maior a velocidade de soldagem menor será o tempo de aquecimento da peça, ou seja, a peça alcança a temperatura de soldagem mais rapidamente quando se utiliza velocidades de soldagem maiores.

Por se tratar de soldagem por atrito, o aquecimento advém do contato entre as peças que giram em torno do seu próprio eixo em velocidades indicadas no gráfico. Considerando que o contato se dá face a face, supondo a solda entre duas peças cilíndricas de mesmo diâmetro, a imposição de uma velocidade maior, por provocar um aquecimento mais rápido, deverá fazer com que esse calor do aquecimento se propague mais rapidamente pela peça, afetando diretamente a Zona Termicamente Afetada (ZTA). Sendo assim, é de se supor que a ZTA aumente na mesma proporção em que a velocidade de soldagem é aumentada. Portanto para $V_1 > V_2 > V_3$, teremos $(ZTA)_1 > (ZTA)_2 > (ZTA)_3$.

Faça valer a pena

1. A Brasagem é um processo de soldagem não convencional, embora amplamente aplicado, que é utilizado para unir duas peças do mesmo material ou mesmo de materiais diferentes sem que ocorra a fusão dos mesmos. Há diversos tipos de brasagem, dentre os quais destacam-se os apresentados nos itens de (A) até (D):

- (A) Brasagem por maçarico.
- (B) Brasagem por forno.
- (C) Brasagem por indução.
- (D) Brasagem por resistência.

Cada tipo de brasagem utiliza equipamentos e dispositivos característicos, apresentados nos itens de (I) até (IV):

- (I) Espira refrigerada por água.
- (II) Eletrodos condutores de corrente elétrica.
- (III) Uso de atmosfera protetora.
- (IV) Uso de vareta de solda revestida com pasta.

Assinale a alternativa a seguir que relaciona de forma correta os tipos de brasagem com seus respectivos equipamentos e dispositivos.

- a) A – I; B – II; C – III; D – IV.
- b) A – II; B – IV; C – III; D – I.
- c) A – IV; B – I; C – II; D – III.
- d) A – IV; B – III; C – I; D – II.
- e) A – III; B – II; C – IV; D – I.

2. A micro soldagem aplica-se a operações delicadas na união de metais com menos de 100 micrômetros de largura e é muito semelhante à soldagem normal, apenas em uma escala muito menor. A micro soldagem é um processo de solda elétrica e pode ser realizada por dois tipos básicos: _____ e _____.

Assinale a alternativa que especifica corretamente os tipos de micro solda que completam as lacunas do texto-base.

- a) eletrodo revestido; arco.
- b) resistência; laser.
- c) resistência; arco.
- d) feixe de elétrons; laser.
- e) arco; feixe de elétrons.

3. Na soldagem do tipo submarina ou subaquática, que é um tipo de soldagem extremamente especializada, existem dois tipos: a solda molhada ou úmida e a solda a seco.

A solda _____ é uma solda _____ realizada com um _____, sendo que _____ atua como condutor. A segurança do soldador-mergulhador está garantida porque o equipamento opera sob _____.

Assinale a alternativa a seguir que contém, na sequência correta, os termos (palavras) que completam a frase apresentada no texto-base.

- a) molhada – elétrica – arco elétrico – a água – corrente alternada.
- b) seca – térmica – arco plasma – o eletrodo – corrente contínua e alternada.
- c) molhada – elétrica – arco plasma – o eletrodo – corrente contínua.
- d) seca – elétrica – feixe de elétrons – a resistência – corrente alternada.
- e) molhada – elétrica – arco elétrico – a água – corrente contínua.

Referências

AMADA miyachi. **Pulse repetition rate (taxa de repetição de pulso)**. [s.d.]. Disponível em: <<http://br.amadamiyachi.com/glossary/glosspulserepetitionrate>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

AMBRELL precision induction heating. **Sobre o aquecimento por indução**. Disponível em: <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/508263/Ambrell_PDFs/411-0169-18.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2018.

AVENTA. **Soldagem subaquática**. 2017. Disponível em: <<https://aventa.com.br/novidades/soldagem-subaqu%C3%A1tica>>. Acesso em: 8 jul. 2018.

AWS – American Welding Society. **Specification for Underwater Welding**. 1999. Disponível em: <https://pubs.aws.org/Download_PDFS/d3.6-1999mPV.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2018.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de soldagem por resistência**. 2000. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2000. Disponível em: <<http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo26.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CIMM. **Microssoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr**. 2008. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/3454-tese-microssoldagem-em-chapas-finas-utilizando-um-laser-de-cu-hbr>. Acesso em: 7 jul. 2018.

CIMM. **Soldagem por eletroescória**. 2010. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=807>. Acesso em: 24 jun. 2018.

CONDOR. **Brasagem**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.condornet.com.br/condor/por/conhecimento/brasagem.cfm>>. Acesso em: 6 jul. 2018.

GIMENES JÚNIOR, L.; TREMONTI, M. A. **Processo de soldagem por difusão**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/processo-de-soldagem-por-difuso.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2018.

HERRMANN ULTRASSOM. **O que é a soldagem por ultrassom?** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.herrmannultraschall.com/pt-br/fundamentos-do-ultrassom/conhecimentos-fundamentais/o-que-e-a-soldagem-por-ultrassom/>>. Acesso em: 8 jul. 2018.

INFOSOLDA. **Brasagem – Características do processo**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/198-brasagem-caracteristicas-do-processo.html>>. Acesso em: 6 jul. 2018.

_____. **Processo de soldagem por difusão**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/327-processo-de-soldagem-por-difusao.html>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

_____. **Soldagem por eletroescória – características**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/205-soldagem-por-eletroescoria-caracteristicas.html>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

_____. **Soldagem por explosão.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/195-soldagem-por-explosao.html>>. Acesso em: 8 jul. 2018.

_____. **Soldagem por feixe de elétrons – fundamentos.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/202-soldagem-por-feixe-de-eletrons-fundamentos.html>>. Acesso em: 15 jul. 2018.

_____. **Soldagem por resistência – tipos de soldagem por resistência.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/185-soldagem-por-resistencia-tipos-de-soldagem-por-resistencia.html>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

_____. **Soldagem por ultra-som.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/197-soldagem-por-ultra-som.html>>. Acesso em: 8 jul. 2018.

MANUTENÇÃO e suprimentos. **Processo de soldagem por fricção.** 2018. Disponível em: <<http://www.manutencaoessuprimentos.com.br/conteudo/6698-processo-de-soldagem-por-friccao/>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

MECÂNICA industrial. **O que é soldagem por feixe de elétrons.** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/380-o-que-e-soldagem-por-feixe-de-eletrons/>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

MM Borges. **Soldagem.** [s.d.]. Disponível em: <<http://mmborges.com/processos/Uniao/uniao%20termica%20-%20soldagem.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

NETTO, L. F. **Arco voltaico – soldaduras.** [s.d.]. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12_12.asp>. Acesso em: 29 jun. 2018.

PORTAL metálica. **O que é soldagem.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.o-metalica.com.br/o-que-e-soldagem>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

SANTOS, A. T. dos. et al. **Soldagem subaquática molhada pelo processo smaw.** 2015. Disponível em: <https://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas_e_engenharia/article/viewFile/187/518>. Acesso em: 8 jul. 2018.

SILVA, F. U. **Processo de soldagem aluminotérmico.** [s.d.]. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/Processo-de-soldagem-aluminotermico.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2018.

WAINER, E. et al. **Soldagem:** processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015.

ISBN 978-85-522-1144-0



9 788552 211440 >